



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## **METODIKA MĚŘENÍ OPTICKÉ PÁTEŘNÍ SÍTĚ**

METHODOLOGY FOR THE MEASUREMENT OF OPTICAL ARTERIAL NETWORK

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

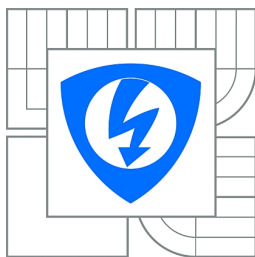
**Bc. JAN CHLEBOUN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.**

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Jan Chleboun

**ID:** 78152

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

### Metodika měření optické páteřní sítě

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce bude navrhnout možnosti zvyšování přenosových rychlostí (nasazování WDM) na stávající optickou síť BAPS - Brněnská akademická počítačová síť. Stanovte metodiku, vhodné měřicí metody, které mohou dát podklad o vhodnosti části optické sítě na případný přechod na vyšší rychlosti. Práce bude řešena na části páteřní sítě BAPS.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] FILKA, M. Přenosová média. Skripta laboratoře. VUT FEKT, Brno 2003.
- [3] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Mikrokom, Praha 2001.
- [3] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Mikrokom, Praha 2001.

**Termín zadání:** 29.1.2010

**Termín odevzdání:** 26.5.2010

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ANOTACE

Díky rozvoji v oblasti telekomunikací a informatiky existují metody jak rozšířit přenosový kanál optického přenosového média. Multiplex je sdružování více signálů do jedné přenosové cesty a vlnový multiplex je po stránce využití maximální přenosové kapacity optického vlákna nejvýhodnější.

Předmětem této práce je zjistit, zda je konkrétní přenosová cesta vhodná pro takovéto rozšíření vlastní kapacity a o jakou hodnotu. Odpověď získáme měřením útlumu, chromatické disperze a polarizační vidové disperze, jejichž hodnoty jsou striktně omezené a určují další postup v expanzi přenosové cesty tvořené optickým médiem. Měřicí metody určují charakter měřené trasy a současné přenosové kapacity. Výstupem je pak návrh metodiky měření, která zaručí správné postupy při případném přechodu na vyšší rychlosti.

Díky získané charakteristice části BAPS (Brněnská akademická počítačová síť) lze konstatovat, že na této části sítě lze zajistit provoz s přenosovou rychlostí 40 Gb/s pouze za podmínek zavedení jistých protiopatření, především výměny konektorů na měřených optických linkách. Jak na linkách se zpětným odrazem překračujícím normu pro tuto přenosovou rychlost, tak i preventivně na linkách, jejichž hodnoty zpětného odrazu dosud vyhovují. Pro chromatickou a polarizační vidovou disperzi zde protiopatření pro jejich omezení nejsou zapotřebí a tak nestojí v cestě plánovanému přechodu části BAPS na vyšší rychlosti.

**Klíčová slova:** xWDM, disperze, útlum, metodika, optika, vlákno

## ABSTRACT

There are methods to extend the transmission channel of optical transmission medium thanks to the development of telecommunications and informatics. Multiplex is a grouping of signals into a single transmission path and wave-division multiplexing is the best reason of use of the maximum fiber optic transmission capacity.

The subject of this work is to determine whether a particular transmission path is suitable for such an extension of their capacity and how much. The answer is obtained by measuring the attenuation, the chromatic dispersion and the polarization mode dispersion, whose values are strictly limited and which determine next steps in the expansion of the transmission path, which is comprised by optical medium. Measurement methods determine the nature of the measured route and its current transmission capacities. Draft of the measurement methodology, which ensures the correct procedures during a possible transition to higher speeds is the output of this work.

Thanks to the acquired characteristics of the BAPS (the Brno Academic Computer Network), the bit rate 40 Gb/s can be provided on this part of the network under the conditions of the introduction of certain countermeasures, particularly the exchange of a connectors on the measured optical lines. As for the back reflection lines in excess of the standard recommendation and pre-emptively on the lines with values with still agree with the return loss. Countermeasure for limiting of the chromatic and the polarization mode dispersion are do not need to stand in the way of a planned transition to a higher rate of the BAPS.

**Key words:** xWDM, dispersion, attenuation, methodology, optics, fibre

CHLEBOUN, J. *Metodika měření optické páteřní sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 57 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma "Metodika měření optické páteřní sítě" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č.140/1961 Sb.“

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miloslavu Filkovi, Csc., za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

# Obsah

1 Úvod.....	7
2 Seznámení s xWDM.....	8
2.1 Druhy multiplexu.....	8
2.2 Vlnový multiplex.....	9
2.2.1 DWDM.....	10
2.2.2 CWDM.....	10
3 Jevy ovlivňující parametry přenosu po optickém vlákně.....	11
3.1 Útlum optických vláken.....	11
3.2 Disperze v optických vláknech.....	13
3.2.1 Chromatická disperze.....	13
3.2.2 Polarizační vidová disperze.....	14
4 Měřicí metody.....	16
4.1 Měření útlumu.....	16
4.1.1 Metoda OTDR.....	18
4.2 Měření CD.....	20
4.2.1 Metoda fázového posuvu.....	20
4.2.2 Metoda zpožděných impulsů v časové oblasti.....	20
4.3 Měření PMD.....	21
4.3.1 Metoda skenování vlnové délky.....	22
4.3.2 Interferometrická metoda (TINTY, GINTY).....	22
5 Praktické ověření měřících metod.....	23
5.1 Seznámení s měřícími přístroji.....	24
5.1.1 Měřicí platformy.....	25
5.1.2 Měřicí modul chromatické disperze.....	27
5.1.3 Měřicí modul polarizační vidové disperze.....	27
5.1.4 Kombinované měřidlo CD/PMD.....	28
5.1.5 Měřicí modul OTDR.....	29
5.1.6 Měřidlo útlumu.....	29
5.1.7 Zdroj optického záření.....	30
5.2 Provedená měření.....	31
5.2.1 Výstup z měřících přístrojů.....	31
5.3 Určení schopností vláken z provedených měření.....	35
5.4 Shrnutí výsledků měření.....	51
6 Závěr.....	53
Seznam literatury a použitých zdrojů.....	55

## Seznam obrázků

Obr. 1: Princip vlnového multiplexu (WDM).....	9
Obr. 2: Stav po polarizaci pulsu.....	14
Obr. 3: Standardní puls.....	14
Obr. 4: Princip zpětného odrazu.....	17
Obr. 5: Princip metody OTDR.....	19
Obr. 6: Příklad průběhu přijatého výkonu zpětného rozptylu.....	19
Obr. 7: Metoda fázového posuvu.....	20
Obr. 8: Metoda zpožděných impulsů v časové oblasti.....	21
Obr. 9: Metoda skenování vlnové délky.....	22
Obr. 10: Interferometrická metoda (GINTY).....	22
Obr. 11: Náhled tabulky z protokolu měření OLTS.....	32
Obr. 12: Náhled náměru OTDR pro 1310 nm.....	32
Obr. 13: Tabulka poruch optického vlákna.....	32
Obr. 14: Graf závislosti útlumu na vlnové délce.....	33
Obr. 15: Náměr přístroje FTB-5700.....	33
Obr. 16: Tabulka naměřených hodnot CD pomocí FTB-5700.....	34
Obr. 17: Závislosti CD a RGD na vlnové délce.....	34
Obr. 18: Tabulka naměřených hodnot CD pomocí FTB-5800.....	34
Obr. 19: Závislost koef. CD vlákna č.2 na vlnové délce.....	36
Obr. 20: Závislost koef. CD vlákna č.3 na vlnové délce.....	37
Obr. 21: Závislost koef. CD vlákna č.4 na vlnové délce.....	37
Obr. 22: Závislost koef. CD vlákna č.5 na vlnové délce.....	38
Obr. 23: Závislost koef. CD vlákna č.6 na vlnové délce.....	39
Obr. 24: Závislost koef. CD vlákna č.7 na vlnové délce.....	39
Obr. 25: Závislost koef. CD vlákna č.8 na vlnové délce.....	40
Obr. 26: Závislost koef. CD vlákna č.9 na vlnové délce.....	41
Obr. 27: Závislost koef. CD vlákna č.10 na vlnové délce.....	41
Obr. 28: Závislost koef. CD vlákna č.11 na vlnové délce.....	42
Obr. 29: Závislost koef. CD vlákna č.12 na vlnové délce.....	43
Obr. 30: Závislost koef. CD vlákna č.13 na vlnové délce.....	43
Obr. 31: Závislost koef. CD vlákna č.14 na vlnové délce.....	44
Obr. 32: Závislost koef. CD vlákna č.15 na vlnové délce.....	45
Obr. 33: Závislost koef. CD vlákna č.16 na vlnové délce.....	46
Obr. 34: Závislost koef. CD vlákna č.17 na vlnové délce.....	46
Obr. 35: Závislost koef. CD vlákna č.18 na vlnové délce.....	47
Obr. 36: Závislost koef. CD vlákna č.19 na vlnové délce.....	48
Obr. 37: Závislost koef. CD vlákna č.20 na vlnové délce.....	48
Obr. 38: Závislost koef. CD vlákna č.21 na vlnové délce.....	49
Obr. 39: Závislost koef. CD vlákna č.22 na vlnové délce.....	50
Obr. 40: Závislost koef. CD vlákna č.23 na vlnové délce.....	50

## Seznam tabulek

Tab. 1: Pásma vlnových délek jednovidových optických vláken.....	11
Tab. 2: Předpokládané hodnoty koeficientu útlumu a koeficientu CD pro systémy CWDM...	12
Tab. 3: Limitní hodnoty PMD [1].....	15
Tab. 4: Přehled parametrů měřicí platformy EXFO FTB-400 [7].....	25
Tab. 5: Přehled parametrů kompaktní měřicí platformy EXFO FTB-200 [7].....	26
Tab. 6: Přehled parametrů měřicího modulu chromatické disperze EXFO FTB-5800 [7].....	27
Tab. 7: Přehled parametrů měřicího modulu polarizační vidové disperze EXFO FTB-5500B [7].....	28
Tab. 8: Přehled parametrů kombinovaného měřidla CD/PMD EXFO FTB-5700 [7].....	28
Tab. 9: Přehled parametrů měřicího modulu OTDR EXFO FTB-5740E [7].....	29
Tab. 10: Přehled parametrů měřicího modulu útlumu EXFO FOT-930 [7].....	30
Tab. 11: Přehled parametrů zdroje optického záření EXFO FLS-5800A [7].....	30
Tab. 12: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.1.....	35
Tab. 13: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.2.....	36
Tab. 14: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.3.....	36
Tab. 15: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.4.....	37
Tab. 16: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.5.....	38
Tab. 17: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.6.....	38
Tab. 18: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.7.....	39
Tab. 19: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.8.....	40
Tab. 20: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.9.....	40
Tab. 21: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.10.....	41
Tab. 22: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.11.....	42
Tab. 23: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.12.....	42
Tab. 24: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.13.....	43
Tab. 25: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.14.....	44
Tab. 26: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.15.....	45
Tab. 27: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.16.....	45
Tab. 28: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.17.....	46
Tab. 29: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.18.....	47
Tab. 30: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.19.....	47
Tab. 31: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.20.....	48
Tab. 32: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.21.....	49
Tab. 33: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.22.....	49
Tab. 34: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.23.....	50

# 1 Úvod

Ačkoliv už dnes optické páteřní sítě nesrovnatelně přesahují svou kapacitou, rychlostí a spolehlivostí ty metalické, kvůli nárůstu požadavků v této oblasti přenosové techniky a zvyšování nároků na přenosovou kapacitu a s tím spojenou rychlost přenosu je nutné zajistit požadované vlastnosti sítě i přes její stále větší zatěžování. Stává se pravidlem, že optické sítě, které ještě donedávna měly, co se týče přenosové kapacity, dostatečné rezervy, jsou již na hranici svých možností.

Nabízí se otázka jak zvýšit kapacitu optické sítě, aniž bychom museli požadovanou trasu například rozšiřovat o další kabely (tzv. vláknový multiplex). Zmíněný způsob se zdá vcelku uspokojující, na druhou stranu až poněkud nákladný. S rozvojem v oblasti telekomunikací a informatiky jsou už dávno známé jiné metody jak rozšířit přenosový kanál optického přenosového média, které tak nečiní po fyzické stránce, nýbrž z pohledu použité technologie.

Multiplex, jakožto sdružování více signálů do jedné přenosové cesty, má několik druhů. Mezi nejpoužívanější patří frekvenční, časový, elektronický avšak po stránce využití přenosové kapacity optického vlákna je nejvýhodnější vlnový multiplex [1]. Tato technologie slučování více záření s různými vlnovými délkami do jedno vlákna se z teoretické a experimentální oblasti přesunula díky vývoji technologií do té praktické a jedná se v dnešní době o hojně rozšířené řešení využití maximální kapacity optického vlákna. Například tak lze u páteřních sítí navýšit rychlost ze současných 1,6 Tb/s až na 20 Tb/s a možný počet kanálů až 128 a 160 [1].

Podle charakteru optického vlákna a schopností dalších přenosových prvků v dané síti je možné volit mezi různými druhy vlnových multiplexů (WDM – Wavelength Division Multiplex), které se podvolují svým rozsahem použití a vlnovými délkami mezinárodním doporučením mezinárodní telekomunikační unie ITU-T.

Základní otázkou však zůstává a hlavní náplní této práce je, jak zjistit, zda-li je konkrétní přenosová cesta tvořená optickým vláknem společně s dalšími přenosovými prvky, jako jsou optické zesilovače a opakovače, vhodná pro takovéto rozšíření vlastní kapacity a jestli ano, tak o jakou hodnotu. Odpověď nám mají poskytnout měření chromatické disperze a polarizační vidové disperze (PMD), jejichž hodnoty jsou striktně omezené a klíčové pro další postup v expanzi přenosové cesty tvořené optickým médiem. Pro tyto účely existují měřicí metody, které nám pomohou určit zda měřená trasa vyhovuje plánovanému navýšení kapacity nebo zda zůstane u současné přenosové kapacity.

Specializované firmy vyrábí měřicí přístroje, které jsou ve správném zapojení a při vhodné měřicí metodě schopny s velkou přesností tyto parametry určit. Výstupem je pak protokol určující schopnost a míru dané optické sítě, ať už páteřní nebo lokální, rozšířit své kapacity a splnit tak náročné požadavky, které jsou na její provoz kladeny.

## 2 Seznámení s xWDM

Navýšení přenosové kapacity lze provést těmito způsoby:

- *vláknový multiplex* – zvýšení počtu vláken v optické přenosové trase
- *zvýšení rychlosti modulace optického systému*
  - nejvíce se využívá systémů pro přenos 10 Gb/s a 40 Gb/s
  - při těchto přenosech se začíná uplatňovat mimo útlumu i chromatická a polarizační vidová disperze optické trasy
- *vlnové multiplexy WDM* – nejperspektivnější metoda využívající současný přenos na více vlnových délkách

### 2.1 Druhy multiplexu

Způsob zvýšení přenosové rychlosti sítí, a to nejen těch optických, spočívá v navýšení počtu přenosových kanálů dané komunikační cesty. Děje se tak multiplexováním, tzn. kombinováním signálů do jedné přenosové cesty nebo kanálu.

Prvním ze způsobů vícenásobného přenosu je *prostorový* (vláknový) *multiplex*, jehož princip spočívá ve využití více optických vláken pro přenos různých signálů. Jeho nevýhodou je však nákladnost při zřizování dalších kabelových tras [1].

Dalším druhem je *frekvenční multiplex*, kdy jsou jednotlivé signály přenášeny do vyšších kmitočtových pásem kde vytváří tzv. skupiny, které se namodulují na optický signál, generovaný laserem, nebo luminiscenční diodou. Možnosti tohoto vícenásobného přenosu jsou omezené parametry zdrojů světelného záření a tak celý multiplexní systém zůstává v oblasti elektronických obvodů stejně jako *časový multiplex*, který pracuje s přidělováním časového intervalu každému signálu, v němž se na vysílací straně připojí vysílač a na druhé straně přijímač daného signálu. U *elektronického multiplexu* se po jednom vlákně nepřenáší binární signál, nýbrž signál vícestavový, pomocí čehož se opět podaří zvednout přenosovou rychlost  $n$ -krát [1].

S pomocí zmíněných druhů multiplexu se dosáhne požadovaného výsledku, avšak mnohem většího využití optického vlákna lze dosáhnout s *vlnovým multiplexem* (WDM – Wavelength Division Multiplex), který využívá možnosti vyzařování různých zdrojů světla o jiných vlnových délkách, které jsou modulovány jednotlivými informačními zdroji [1].

Tato metoda zvýšení přenosové kapacity optického vlákna a zvláště pak její parametry a jejich měření jsou stěžejní témata pro tuto práci a podrobnějšímu popisu těchto záležitostí jsou proto věnovány až následující kapitoly.

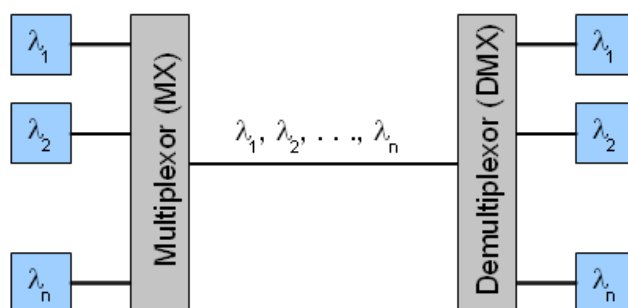
Poté co bychom rozšířili vlnový multiplex o elektronický, bychom získali

tzv. *hybridní multiplex*, díky němuž je možné využít maximální možné přenosové možnosti optického vlákna [1].

## 2.2 Vlnový multiplex

Z hlediska zvýšení přenosové rychlosti optické sítě, respektive navýšení počtu přenosových kanálů díky využití přenosové kapacity optického vlákna, je vlnový multiplex vhodnou technologií pro řešení tohoto problému. Klasický multiplexní  $n$ -kanálový systém (Obr. 1) je tvořen  $n$  modulátory, zdroji světla i detektory a multiplexorem plnícím funkci napojování záření jiných vlnových délek z  $n$  vysílačů do jediného optického vlákna (např. jednoduché neselektivní optické vidlice) a demultiplexorem (většinou optické filtry), který z optického média vyděluje příslušné vlnové délky pro konkrétní přijímače. Je třeba při tom dbát minim útlumu a disperze v celém pásmu propustnosti světlovodu, dostupnosti zdrojů světla pro určené vlnové délky a na potřebné selektivity optických zdrojů, které jsou určeny typickou útlumovou křivkou optického vlákna [1].

Pro kvalitní přenos pomocí WDM jsou podstatné rozestupy kanálů, jejichž hodnoty jsou určeny parametry vysílače a přijímače optického signálu. V případě, je-li použita jako zdroj záření luminiscenční dioda (LED), pak je rozestup určen šířkou spektra emitovaného světla. Je-li použita laserová dioda (LD) pak rozestup závisí na přesnosti a stálosti střední hodnoty vlnové délky emitovaného světla. Už z obecné charakteristiky vyzářování LD je znatelné, že do pracovní oblasti lze umístit více kanálů než je tomu u LED, avšak překrývání spekter není vyloučeno ani u jednoho z těchto zdrojů a může dojít k přeslechům (mezikanálové interferenci), jak bude probráno dále [1].



Obr. 1: Princip vlnového multiplexu (WDM)

Vlnové multiplexy se dělí do několika druhů a to jednak podle počtu vlnových délek použitých pro přenos a jednak podle rozestupů mezi jednotlivými vlnovými délkami. Jestliže původní WDM používal pro přenos v obousměrném provozu na jednom optickém vlákne dvě nebo tři vlnové délky, pak vývoj v oblasti těchto systémů přinesl jistá vylepšení.

Běžně využívaným systémem pro přenos 1 Gb/s a 10 Gb/s Ethernetu je „široký“

vlnový multiplex (WWDM – Wide WDM), který pro přenos využívá čtyři vlnové délky a to v oblastech 850 nm pro MM vlákna a 1300 nm a 1310 nm pro MM a SM vlákna.

Zmíněná varianta, ať už se zdá jakkoliv uspokojivá, v dnešní době je dostačující již pouze pro lokální síť. Existují už WDM, které s pomocí desítek vlnových délek dokáží zvýšit počet kanálů několikanásobně oproti WWDM. Říká se jim „hustý“ vlnový multiplex (DWDM – Dense WDM) a „hrubý“ vlnový multiplex (CWDM – Coarse WDM) [1].

### 2.2.1 DWDM

„Hustý“ vlnový multiplex se vyznačuje minimálními odstupy mezi jednotlivými kanály, díky čemuž může do vlákna navázat až desítky vlnových délek. Podmínkou je zajistit extrémně úzkou spektrální čáru a dostatečnou kmitočtovou stabilitu jednovidových laserů a úzkopásmových interferenčních filtrů. Rozčlenění kanálů je záležitostí elektronických filtrů, které tak musí činit pomocí mezifrekvence na straně přijímače, který obsahuje směšovač a kmitočtově stabilizovaný koherentní zdroj světla tvořící oscilátor. V praxi je také nutné počítat s tím, že v závislosti na použité vlnové délce pro konkrétní kanál nemusí být dosah všech kanálů stejný, a proto je potřeba uvažovat s nejhorsí možnou variantou a kanály s nejhorsím dosahem ovlivňujícími celkový dosah jednoduše vyřadit [1].

Poté, co byly díky pokroku ve vývoji a výrobě v této oblasti sníženy ekonomické nároky spojené s výrobou a provozem, zavedl se systém DWDM i na optických páteřních sítích v České republice.

Detailní rozvržení odstupů kanálů na konkrétních vlnových délkách a jejich pracovních kmitočtů je uvedeno v doporučení *ITU-T G.694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“*. Jsou zde zobrazeny některé nominální střední frekvence v C a L pásmu při minimálním odstupu kanálů 12,5 GHz (0,1 nm) odstupňovaného od kmitočtu 193,1 THz. Je zde doloženo i rozmístění frekvencí s odstupem 25 GHz (cca 0,2 nm), 50 GHz (cca 0,4 nm) a 100 GHz (0,8 nm) ve stejné oblasti [4]. Koncové body jsou zobrazeny ilustrativní, nikoli normativní, podle [1] je to rozsah od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186 THz).

### 2.2.2 CWDM

„Hrubý“ vlnový multiplex je odvozen od DWDM s tím rozdílem, že se jedná o jeho levnější variantu, která používá větší rozestupy mezi přenosovými kanály, díky čemuž jsou na ní kladeny nižší nároky než je tomu u klasického DWDM. Doporučení *ITU-T G.694.2 „Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid“* určuje odstup mezi kanály na vlnových délkách pro CWDM aplikace, který by měl být 20 nm. Tyto odstupy vlnových délek byly podle verze tohoto doporučení posunuty o 1 nm, aby byly v souladu se stávající praxí v odvětví a zároveň zachovávaly odchylky symetrické nominální střední vlnové délky.

Rozsah vlnových délek CWDM je 1271 nm až 1611 nm a jejich rozpis je zde v [5] uveden. Odstup mezi přenosovými kanály byl navíc volen tak, aby u zdrojů záření nebyly příliš vysoké nároky na chlazení.

Všech 18 doporučených kanálů lze využívat pouze na optickém vlákně typu „Metro“, které je vyrobeno bez navýšení v oblasti vlnových délek 1360 nm až 1450 nm (tzv. water peak). Pro obyčejné optické vlákno 9/125  $\mu\text{m}$  je tedy k dispozici vlnových délek pouze 12 [1].

### 3 Jevy ovlivňující parametry přenosu po optickém vlákně

Chceme-li zvyšovat rychlost optické sítě, musíme počítat s fyzikálními jevy ovlivňujícími datový přenos po optickém vlákně. Pro tyto rušivé elementy existují limity rozhodující, zda je vlákno vhodné pro přenos a jestli ano, pak rozhodují o délce vedení, po kterém bude probíhat přenos, aniž by obsahovalo prvky, které zesilují nebo opakují optický signál. Optické vlákno, na kterém až dosud probíhal přenos s vyhovujícími vlastnostmi na nižší rychlosti, nemusí vyhovět požadavkům a kritériím spojenými s přenosem na vyšší rychlosti, než je ta dosavadní.

Mezi parametry vláken, které rozhodují o kvalitě přenosu a dalším rozvoji přenosové cesty, patří zejména *útlum optických vláken* a *disperze v optických vláknech*.

#### 3.1 Útlum optických vláken

Útlum optických vláken má vliv především na dosah optického signálu, nebo-li na maximální délku trasy optického vlákna bez zesilovačů a opakovačů. Útlum lze jednoduše vyjádřit jako ztráty vlivem negativních parametrů vláken jako je absorpce záření, vyzařování záření z vlákna a rozptylem na nehomogenitách vlákna. Na velikosti útlumu se také podílí teplota okolí kabelu.

Pásmo	Název	Rozsah [nm]
O	Original	1260-1360
E	Extended	1360-1460
S	Short	1460-1530
C	Conventional	1530-1665
L	Long	1565-1625
U	Ultra-long	1625-1675

Tab. 1: Pásmo vlnových délek jednovidových optických vláken

Pro přenos světla po optickém vlákně je určeno rozmezí vlnových délek zhruba od 0,5 do 1,6  $\mu\text{m}$ . Z tohoto rozsahu jsou pro optický přenos kvůli nadměrnému zvýšení měrného útlumu některé vlnové délky zcela nevhodné. Jedná se o vlnové délky 0,95  $\mu\text{m}$ ,

1,24  $\mu\text{m}$  a 1,39  $\mu\text{m}$ , na nichž se projevuje útlum vlivem OH radikálů, které pocházejí ze zbytků molekul vody, obsažených v jádru světlovodu. Z pohledu minimálního měrného útlumu jsou pro přenos nejvhodnější vlnové délky 0,8 až 0,9  $\mu\text{m}$ , okolo 1,3  $\mu\text{m}$  (oblast nulového útlumu) a kolem 1,55  $\mu\text{m}$ . Pro dohledové systémy se navíc využívá délka 1,625  $\mu\text{m}$  [2].

V praxi se nejčastěji pro rychlý (gigabitový) přenos používají vlnové délky v pásmech S, C a L (Tab. 1), pro účely WDM pak konkrétně pásma C a L. S vývojem v oblasti výroby vláken a eliminací příměsi OH, kdy se podařilo lokální maximum útlumu na délce 1380 nm odstranit, se započalo i s rozšiřováním pásma U (zhruba od roku 2000) [1].

Předpokládané minimální a maximální hodnoty koeficientu útlumu pro každou vlnovou délku pro systémy CWDM zobrazuje Tab. 2. z doporučení *ITU-T G.695: Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications*. Tyto hodnoty byly získány kombinovaným měřením koeficientu útlumu kabelů optických vláken uložených pod povrchem na vlnových délkách 1550 nm a 1625 nm s celo-spektrovým měřením nekabelových vláken pro limity uvedené v *ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [13].

$\lambda$ [nm]	Koeficient CD [ps/nm*km]	Kabel G.652 A&B		Kabel G.652 C&D	
		Minimální koeficient útlumu [dB/km]	Maximální koeficient útlumu [dB/km]	Minimální koeficient útlumu [dB/km]	Maximální koeficient útlumu [dB/km]
1271		0,392	0,473	0,385	0,470
1291		0,370	0,447	0,365	0,441
1311	1,60	0,348	0,423	0,352	0,423
1331	3,34	0,331	0,425	0,340	0,411
1351	5,02	0,320	0,476	0,329	0,399
1371	6,62			0,316	0,386
1391	7,97			0,301	0,372
1411	9,14			0,285	0,357
1431	10,31	0,263	0,438	0,269	0,341
1451	11,49	0,250	0,368	0,254	0,326
1471	12,68	0,238	0,327	0,240	0,312
1491	13,86	0,229	0,303	0,229	0,300
1511	15,06	0,221	0,290	0,220	0,290
1531	16,25	0,215	0,283	0,213	0,283
1551	17,46	0,211	0,278	0,209	0,277
1571	18,66	0,208	0,276	0,208	0,273
1591	19,87	1,208	0,278	0,208	0,275
1611	21,09	2,208	0,289	0,212	0,283

Tab. 2: Předpokládané hodnoty koeficientu útlumu a koeficientu CD pro systémy CWDM

## 3.2 Disperze v optických vláknech

Největší vliv na zkreslení přenášeného signálu má disperze, která je definována jako rozdíl šířky impulzu v polovině výšky na začátku a konci vlákna. Jedná se o nejdůležitější parametr optických vláken, který určuje šířku přenášeného pásma a tudíž i přenosovou rychlost.

### 3.2.1 Chromatická disperze

Potřeba měřit chromatickou disperzi nastala až s nástupem systémů DWDM a jeho nasazováním do stávajících sítí. Při těchto přenosech se v optickém vlákne šíří různé spektrální složky signálů jinou rychlostí. Signál je tvořen z více spektrálních složek, takže po průchodu optickým vláknem se stane, že se některé složky oproti ostatním zpozdí a signál se tak zdeformuje (impuls se roztáhne) a zasahuje do vedlejších bitových mezer a dojde ke zkreslování přenášené informace. Chromatická disperze optického vlákna je vyjádřena tzv. koeficientem chromatické disperze  $D(\lambda)$ , který udává změnu skupinového zpoždění signálu  $t_g$  při průchodu vláknem v závislosti na vlnové délce  $\lambda$  [1].

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \text{ [ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (3.1)$$

Vzhledem k tomu, že koeficient chromatické disperze je závislý na vlnové délce, Tab. 2 podle ITU – T G.695 obsahuje předpokládané hodnoty maximálních koeficientů chromatické disperze na střední vlnové délce pro každý z kanálů používaných v tomto doporučení [13].

Nejkritičtější oblast s nejvyšší hodnotou disperze okolo 1,55  $\mu\text{m}$  se již podařilo technologicky odstranit a dosáhnout v tomto místě šířky pásma nulových hodnot disperze díky vláknům DSF (Dispersion Shifted Fibre) s posunutou nebo plochou disperzní charakteristikou [1].

### Kompenzace CD

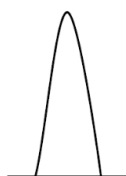
Jelikož se systémy xWDM často aplikují i na starší již položená vlákna, která mají disperzi vysokou, využívají se proto kompenzační vlákna DCF (Dispersion Compensation Fibre) s vysokou hodnotou záporné chromatické disperze ve formě cívky tohoto vlákna zapojené na konci trasy. Disperzi konvenčních a NZDF (Non Zero Dispersion Fibre) vláken pomáhají také kompenzovat HOM (High Order Mode Fibre) vlákna a Braggovské mřížky [1].

## Relativní skupinové zpoždění

DWDM systémy pracující na 40 Gb/s představují z hlediska měření řadu nelehkých problémů. Chromatickou disperzi je tak potřeba podrobněji charakterizovat. Na vyšší přenosové rychlosti se uplatňuje relativní skupinové zpoždění (RGD – Relative Group Delay), v důsledku chromatické disperze se stává v některých částech určující pro propustnost systému. Širokopásmový popis chromatické disperze v optických vláknech je dostatečný, avšak je mnohem náročnější charakterizovat optické prvky z pohledu úzkopásmových filtrů pro přenosovou rychlost 40 Gb/s, protože tyto systémy mohou vyžadovat rozlišení RGD v měřítku ps, napříč šířkou pásma v řádu desítek pm. Proto Národní institut pro standardy a technologie (NIST) vyvinul měřicí techniku RGD cílenou na měření prvků pro 40 Gb/s [14].

### 3.2.2 Polarizační vidová disperze

Stejně jako chromatickou disperzi tak i polarizační vidovou disperzi nebylo nutné před nástupem systémů a technologií poskytujících vyšší rychlost přenosu měřit. Při průchodu vidu optickým vláknem se vlivem kruhové nesymetrie, způsobené např. mikroohyby při montáži, šíří tento vid ve dvou vzájemně na sebe kolmých rovinách (Obr. 2 a Obr. 3), v nichž se šíří jinou rychlostí a to má potom za následek zkreslení impulsu nebo jeho rozšíření. PMD (Polarisation Mode Dispersion) je jeden z problémů projevujících se při nasazení 10 Gb/s ale hlavně 40 Gb/s optických sítí. Vlivem PMD se totiž omezuje rychlost přenášeného signálu a také odstup signál-šum (SNR).



Obr. 3: Standardní puls



Obr. 2: Stav po polarizaci pulsu

Polarizační vidovou disperzi vyjadřuje koeficient PMD. Pro krátké vzdálenosti do 10 km platí:

$$PMD = \frac{\Delta \tau}{l} \text{ [ps} \cdot \text{km}^{-1}\text{]}, \quad (3.2)$$

kde  $l$  je délka trasy a  $\Delta \tau$  zpoždění signálu. Pro velké vzdálenosti se signál nešíří lineárně, ale s odmocninou délky:

$$PMD = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{l}} \text{ [ps} \cdot \sqrt{\text{km}^{-1}}\text{]}. \quad (3.3)$$

<b>Přenosová rychlost [Gbit·s<sup>-1</sup>]</b>	0,155	0,622	2,500	10,000	40,000
<b>SDH</b>	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
<b>trvání 1 bitu [ps]</b>	6430,00	1610,00	401,88	100,47	25,12
<b>limit PMD [ps]</b>	640,0	160,0	40,0	10,0	2,5
<b>limit PMD deklarace 1/10 [ps]</b>	643,00	161,00	40,10	10,00	2,51
<b>PMD<sub>koef</sub> na 400 km [ps/√km]</b>	< 32,000	< 8,000	< 2,000	< 0,500	< 0,125

Tab. 3: Limitní hodnoty PMD [1]

V Tab. 3 jsou uvedeny limitní hodnoty PMD podle *ITU-T G.697*. Omezení hodnot tohoto parametru je možné pouze výběrem kabelů z vlákna jejichž hodnota odpovídá stanovenému limitu PMD [1].

Doporučené hodnoty potřebné pro podporu aplikací, jako jsou ty, které popisují doporučení *ITU-T G.957* a *G.691* nad STM-16, stejně tak 10 Gb/s na 40 km (Ethernet) a STM-256 pro doporučení *ITU-T G.693* a umožňují přenosy v omezeném rozsahu vlnových délek od 1360 nm do 1530 nm, popisuje doporučení *ITU-T G.952* a určuje limit koeficientu PMD pro uvedenou kombinaci systému pro jednovidová vlákna na  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  [12].

### **Kompenzace PMD**

Mezi efektivní způsob jak kompenzovat negativní účinky PMD je stanovit účinky PMD v době přenosu, před tím než přijímač dekóduje bity. Tato metoda je známá jako kompenzace PMD. Kompenzátor PMD je umístěn na cíli přenosového systému, může snížit účinky disperze ve vláknu a zajistit, že bity budou správně dekódovány přijímačem, před tím, než se budou směřovat.

Nevyhovuje-li přenosová cesta pro konkrétní vlnovou délku, je možné vyzkoušet jiný rozsah použité frekvence. Tento jednoduchý způsob je však často těžko realizovatelný a účinný jen v malém procentu případů.

Mezi krajní způsoby řešení patří výměna celé optické trasy nebo úseku vlákna, zpravidla používané pro optické trasy se starými optickými vlákny vyrobenými v devadesátých letech a pro trasy s poškozenými vlákny [15].

### **Diferenční skupinové zpoždění**

V určité vzdálenosti kdy PMD ovlivnila impuls, je polarizace posunuta o nějaký čas. Tato doba je známá jako zpoždění DGD (Differential Group Delay), které je základním měřítkem PMD a je měřeno v ps ( $10^{-12}$ ). Pokud vznikne DGD, přijímač nemusí v určité vzdálenosti optického pulsu přesně dekódovat signál, a tím může vzniknout chyba.

Diferenční skupinové zpoždění je rozdíl v době příchodu dvou polarizačních stavů

pro konkrétní vlnovou délku a čas. Pro spoj s konkrétním PMD koeficientem se DGD tohoto spoje v čase a vlnové délce náhodně mění s Maxwellovou distribuční funkcí, která obsahuje jediný parametr, který je výsledkem PMD koeficientu spoje a druhé odmocniny délky spoje. Zhoršení přenosu v důsledku PMD v určitém čase a při určité vlnové délce závisí na DGD v té době a vlnové délce. Takže, způsoby stanovení použitelných limitů distribuce DGD se týkají distribuce PMD koeficientů optických kabelů a jejich limitů [13].

Maximální povolená hodnota DGD podle *ITU-T G.652* pro limitní hodnotu PMD  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  a přenosovou rychlost 40 Gb/s, která by mohla být použitelná pro tento typ sítě je přibližně 0,7 ps na trase délky 80 km.

## 4 Měřicí metody

Jak už bylo uvedeno výše, abychom mohli zvýšit přenosovou rychlost stávající položené optické sítě, je potřeba nejprve určit, zda je tato síť schopna rozšíření a provozu s vyššími přenosovými rychlostmi. Za tímto účelem byly vytvořeny metody měření, pomocí kterých se dá o tomto faktu rezolutně rozhodnout. Umožňují měřit nejdůležitější potřebné parametry, jimiž jsou útlum, chromatická a polarizační vidová disperze optických vláken.

Pro každý parametr vlákna existuje řada měřících metod, avšak některé jsou uzpůsobeny pouze pro měření v laboratorních podmínkách. Jelikož zvyšování přenosové rychlosti se provádí pro stávající optická vlákna, je vhodnější použít měřící metody schopné pracovat spíše v terénu. V následujícím výčtu měřících metod jsou uvedeny právě měřící metody, které jsou rychlé a pro měření v terénu v praxi nejvíce rozšířené a navíc schopné měřit i když jsou v měřené trase zapojeny EDFA zesilovače, které právě ke snadnému změření optického vlákna příliš nepřispívají.

### 4.1 Měření útlumu

Chceme-li měřit útlum trasy v terénu, je velmi příznivé, když je možné pomocí měřící metody měřit pouze z jednoho konce vlákna a zjistit tak vše potřebné ohledně útlumu vlákna a všech aspektech, které ho způsobují. Takovéto možnosti skýtá *metoda zpětného odrazu* (ORL - Optical Return Loss).

ORL je vyjádřen v pozitivních hodnotách decibelů (dB) (4.3), a je definován jako logaritmický poměr mezi vysílaným a přijímaným výkonem (zpětný odraz + zpětný rozptyl) ve vlákně. Čím vyšší hodnota, tím nižší je síla odrazu a a tak menší vliv reflexe aktivních přenosových prvků: 40 dB je lepší než 30 dB ORL [10].

Podle známého vztahu

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [dB]} \quad (4.1)$$

pak lze snadno určit útlum optického vlákna mezi dvěma body, kde  $P_1$  a  $P_2$  jsou optické výkony (W) při vlnové délce  $\lambda$ . Jestliže je distribuce vidů ve vláknech ustálená, tak pro vlnovou délku  $\lambda$  je definován měrný útlum vlákna jako

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{l} \text{ [dB} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4.2)$$

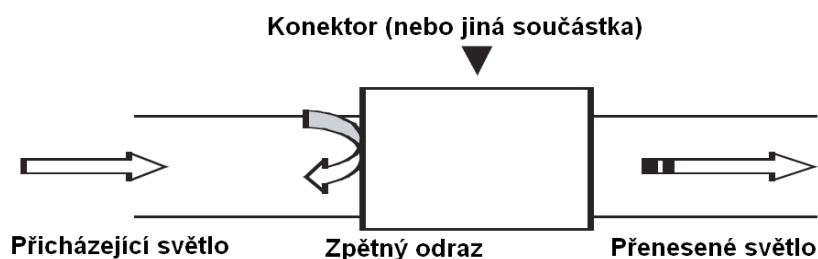
kde  $l$  (km) je vzdálenost mezi prvním a druhým bodem [1].

$$ORL = -A \text{ [dB]} \quad (4.3)$$

### Účel ORL testování

Zjišťováním ORL měříme zpětný odraz konektorů a součástek ve vysokorychlostních digitálních a analogových systémech používaných v Tel-co, CATV, LAN a WAN aplikacích (Obr. 4). Pro zajištění správné stability laserů a jejich centrální vlnové délky, je nutné měřit zpětný odraz již při instalaci nebo údržbě sítě určené pro přenos na těchto rychlostech.

Jednoduše vyjádřeno, zjišťováním ORL měříme rozdíl mezi množstvím světla vyslaného zdrojem a množstvím, které se vrací ke zdroji. Ztráty zpětným odrazem vždy představují významný problém pro DWDM systémy, protože snižují množství přeneseného světla.



Obr. 4: Princip zpětného odrazu

### Důsledky zpětného odrazu

Hlavní účinky zpětného odrazu zahrnují následující:

- je přeneseno méně světla
- způsobuje rušení signálu ze světelného zdroje
- vytváří vyšší bitové chybovosti (BER) v digitálních systémech

- snižuje poměr signál/šum (SNR) v analogových systémech

Dalším negativním účinkem zpětného odrazu je, že světlo se vrací do světelného zdroje. Vzhledem k tomu, že zdroj světla je navržen tak, aby emitoval a nepřijímal, vysoký zpětný odraz tak může přinést několik dalších důsledků:

- způsobuje kolísání centrální vlnové délky světelného zdroje
- zapříčiňuje výkyvy jeho výstupního výkonu
- ničí trvale světelný zdroj

Kromě toho, výkyvy vlnové délky způsobují chyby v kalibraci detektoru na druhém konci optického spoje. Pro zaručení výkonnosti, výrobci uvádějí maximální množství světla, které se může vrátit do zdroje beze změny kvality světelného signálu a bez ztráty přenosu dat. [9]

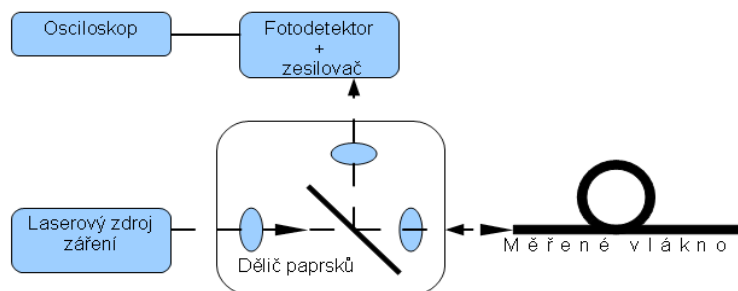
Velikost maximální hranice ORL je podle *ITU-T G.691: Optical interfaces for single channel STM-64 systems, STM-256 systems, and other SDH systems with optical amplifiers* a *Telecordia GR-1312-CORE: Generic requirements for Optical Fibre Amplifiers (OFAs) and proprietary DWDM systems* stanovena na 27 dB [10, 11].

Akceptovatelné ORL hodnoty se v telekomunikačním odvětví liší také v závislosti na typu konektoru:

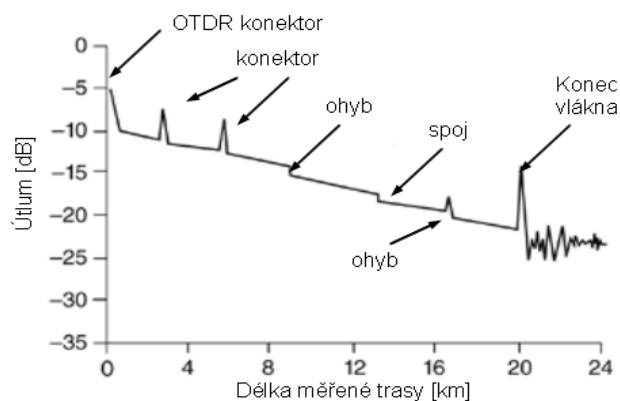
- PC (fyzický kontakt), je mezi 20 a 25 dB.
- UPC (ultra-hladký fyzický kontakt), je mezi 35 a 55 dB.
- APC (zkosený fyzický kontakt), může se pohybovat mezi 55 až 70 dB [9].

#### 4.1.1 Metoda OTDR

Metoda zpětného rozptylu, nebo-li metoda optické reflektometrie v časové oblasti (OTDR – Optical Time-Domain Reflectometry) slouží k vyhodnocení závislosti zpětně rozptýleného optického výkonu z šíření úzkého optického impulsu měřeným optickým vláknem pomocí Rayleighova rozptylu. Je nejpoužívanější metodou pro montážní a provozní měření mnoha parametrů vláken, kabelů a optických tras. Princip měřicího přístroje OTDR je naznačen na Obr. 5. I když jsou Fresnelovy odrazy vzniklé na bodové poruše nebo na koncích vlákna nežádoucí, lze díky nim měřit délku vlákna a lokalizovat poruchy. Tento jev nastává při dopadu optického záření na rozhraní dvou prostředí s jiným indexem lomu, což se děje v každém optickém konektoru nebo mechanické a svařované spoje. Takto vzniklé odrazy jsou naznačeny na průběhu přijatého výkonu zpětného rozptylu na Obr. 6 [1].



Obr. 5: Princip metody OTDR



Obr. 6: Příklad průběhu přijatého výkonu zpětného rozptylu

### Rozdíly mezi testováním pomocí ORL a OTDR

Port ORL testeru je vybaven jak světelným zdrojem, tak i detektorem. Světelný zdroj vyzařuje spojitou vlnu a detektor přijímá odraženou spojitou vlnu pro měření zpětného odrazu. Naopak, OTDR je navržen pro odlišný cíl. Emituje pulsy světla, aby zjistil polohu jevů; zpětný odraz lze zhruba odhadnout vracejícím se pulsem. V důsledku toho jsou OTDR méně přesné, co se týče měření zpětného odrazu. Jsou ohroženy šumem, vzdáleností a šířkou pulsu.

Dalším důvodem proč OTDR není spolehlivý způsob zjištění ORL, je přítomnost mrtvých zón, které se objevují po silné odrazivosti. Tyto mrtvé zóny brání OTDR měření malých odrazů, které často provází některý z velkých jevů ve vlákne. ORL hodnoty získané z OTDR jsou podstatně méně přesné než získané ORL testerem. Ve skutečnosti, ORL tester je tester speciálně navržený pro tento jediný účel a není ovlivněn velkými projevy odrazů. Jeho hlavní část není ovlivněna šumem, vzdáleností nebo šířkou impulsu [9].

Maximální povolené hodnoty měrného útlumu vláken jsou podle doporučení *ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* pro rozsah vlnových délek 1310 až 1625 nm stanoveny na 0,4 dB/km a maximum 0,3 dB/km na vlnové délce 1550 nm. Tato omezení jsou určující zejména pro vysokorychlostní datové toky aplikací běžících na STM-64 a STM-256 [12].

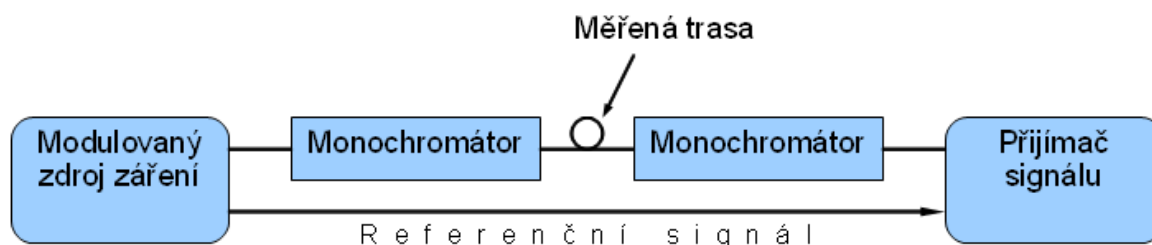
## 4.2 Měření CD

Pro měření chromatické disperze CD (Chromatic Dispersion), jsou zapotřebí metody schopné proměřit celé vyzařované spektrum vlnových délek a pokrýt tak i celou šířku kanálu. Důležité je i proměřit chování vlákna v místech šířky kanálu, kde disperze skokově narůstá, většinou v okolí vlnové délky 1380 nm (tzv. water peak), hlavně pro vlákna do roku výroby 2000 a starší. *Metoda fázového posuvu a metoda zpožděných impulsů v časové oblasti* zcela vyhovují kladeným nárokům.

### 4.2.1 Metoda fázového posuvu

Metoda fázového posuvu (PS - Phase Shift) se často používá jako referenční metoda k určení chromatické disperze optických vláken. Principem je vyslání modulovaného signálu o několika vlnových délkách do měřeného optického vlákna a současně stejného signálu do referenčního vlákna. Po průchodu měřenou trasou se na přijímací straně obě fáze signálu v obou vláknech porovnají a zjistí se fázový posuv mezi těmito signály, který je způsoben právě chromatickou disperzí a je tak její mírou.

Vysokofrekvenční modulace se šíří rychlostí, která je závislá na vlnové délce a polarizaci a hodnoty jsou získány rozdíly v době přenosu mezi modulacemi na různých vlnových délkách (k získání přesných hodnot těchto rozdílů, polarizační účinky musí být zprůměrované, kalibrované nebo kompenzované). Čím vyšší je počet vlnových délek, se kterými bude měřeno, tím přesnější bude výsledek CD [1].



Obr. 7: Metoda fázového posuvu

### 4.2.2 Metoda zpožděných impulsů v časové oblasti

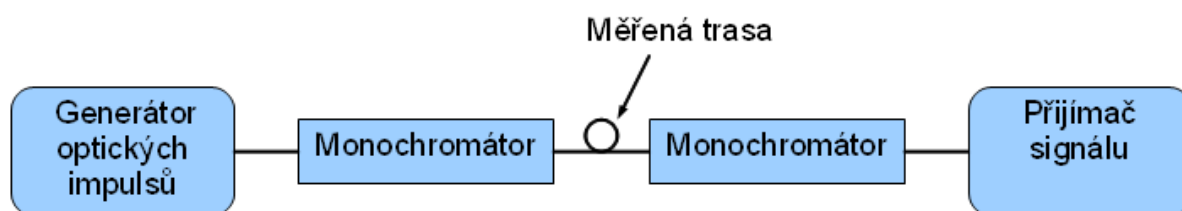
V případě této metody jsou do měřené trasy za sebou vyslány optické impulsy o různých vlnových délkách a to v přesných časových rozestupech. Po průchodu trasou se vlivem chromatické disperze časové rozestupy impulsů změní. Z porovnání rozestupů jednotlivých optických impulsů na vstupu a na výstupu měřené trasy se potom určuje zpoždění vlivem chromatické disperze.

Princip této metody je naznačen na Obr. 8. Jako zdroj záření měřicí soustavy je

možné využít skupinu laserových diod nebo širokospektrální zdroj, kdy jednotlivé vlnové délky budou vybírány pomocí monochromátoru (buď ihned za zdrojem záření nebo před detekční soustavou).

Metoda zpoždění impulsů v časové oblasti nemá většinou možnost nastavování vstupních rozestupů mezi impulsy. Ty jsou dány přímo mechanickou konstrukcí přístroje. K měření se vzhledem k tomu používá pouze jedno optické vlákno (přímo měřená trasa), protože přijímací strana zná vstupní rozestup impulsů a není třeba referenční cesty. Jedná se o velmi rychlou metodu, u které doba měření jednoho vlákna netrvá déle než několik sekund.

Jednou z modifikací této metody je využití principu OTDR (metoda měření zpětného rozptylu užívaná standardně k měření útlumu optických tras). Přístroje pracující na této bázi využívají jako impulsní zdroje záření samotné laserové diody klasických OTDR pro měření útlumu s tím, že v tomto případě je nutné měřit na více vlnových délkách (1310 nm, 1380 nm, 1550 nm a 1625 nm).



Obr. 8: Metoda zpožděných impulsů v časové oblasti

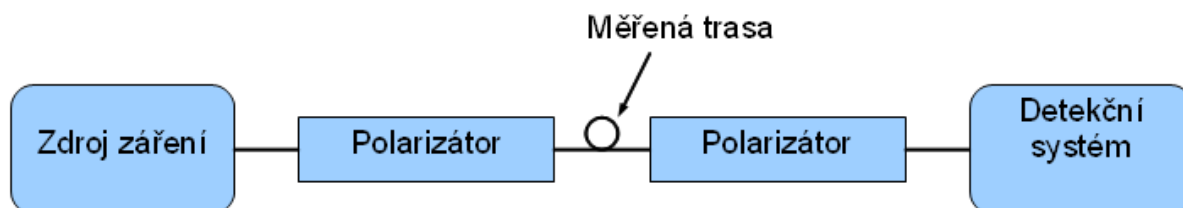
Výhoda této metody je v tom, že touto metodou provádíme zároveň též spektrální měření útlumu optické trasy. Jiná výhoda plynoucí z principu OTDR spočívá v tom, že měření se provádí na trase vždy z jednoho místa, jelikož se vyhodnocuje odražený signál od druhého nezapojeného konce trasy. Je ovšem také nutné, aby na volném konci byl dostatečný odraz, což je problematické u tras se šikmými APC konektory. V tomto případě je nutné na konec trasy připojit ještě přidavný odrazný modul, čímž se zde výhoda jednostranného měření ztrácí [6].

### 4.3 Měření PMD

U této metody je velmi nutná přesnost použitých přijímačů optického signálu, které musí být schopny přijímat spektrální změnu polarizace záření. Vhodné postupy jsou jak *metoda skenování vlnové délky*, tak i *interferometrická metoda*.

### 4.3.1 Metoda skenování vlnové délky

Tato metoda patří mezi měřicí metody určené k jednostrannému měření. Vychází z principu stanovení optického výkonu procházejícího danou měřenou optickou trasou v závislosti na vlnové délce. Zjišťujeme spektrální změnu polarizace současným vysláním záření s nepolarizovanou vlnovou délkou a s polarizovanou vlnovou délkou, obou stejné barvy. Tento postup se provede několikrát pro několik různých barev (vlnových délek). Jako širokopásmový zdroj záření může být použit laditelný laser a přijímač může být tvořen optickým spektrálním analyzátozem.



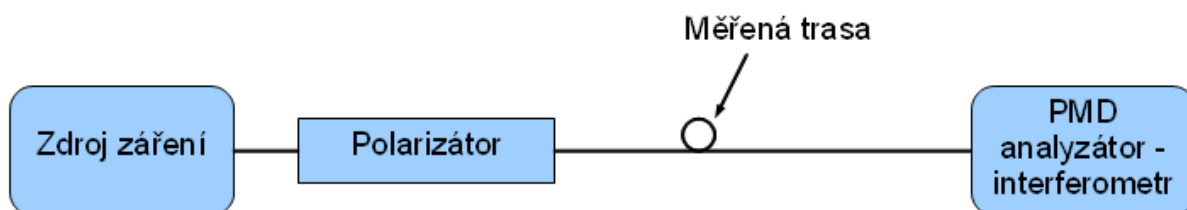
Obr. 9: Metoda skenování vlnové délky

### 4.3.2 Interferometrická metoda (TINTY, GINTY)

Princip interferometrické metody, označované též jako TINTY (Traditional Interferometric Analysis), je založen na interferenci (skládání vlnění) nízkokoherentního optického záření. Záření je na výstupu měřené optické trasy rozděleno interferometrem do dvou větví, kde v jedné je umístěno pohyblivé a ve druhé pevné zrcadlo. Pohyblivým zrcadlem se mění fázový posun mezi přijímanými signály v obou větvích a pomocí interference na detektoru zobrazíme zpoždění vlivem PMD [1].

GINTY (General Interferometric Analysis) je novější verze TINTY a potlačuje vliv autokorelační špičky, protože výsledný signál obsahující optické záření z obou ramen interferometru je znovu rozdělen polarizačním děličem na dvě vzájemně kolmo polarizované složky a každá přitom dopadá na zvláštní detektor. Korelační složky jsou pak vyjádřeny pomocí interference, k níž na nich dochází. Odečtením interferogramu obdržíme vzájemnou korelaci, sečtením získáme čistou korelaci [1].

Výhoda této metody je v tom, že umožňuje měřit trasy přes EDFA zesilovače. Tato metoda je rychlá a není potřeba měřit zvlášť jednotlivé úseky trasy.



Obr. 10: Interferometrická metoda (GINTY)

## 5 Praktické ověření měřících metod

Všechny výše uvedené metody měření sloužící ke zjištění přenosových parametrů optických kabelových tras, lze využít pro určení faktu, zda je tato trasa schopna provozu na vyšších přenosových rychlostech. Především pak v praktickém užití se jedná o velmi efektivní metody pro měření v terénu na stávajících sítích.

Jednou ze stávajících optických sítí, které v nejbližší době projdou rozšířením stávajícího provozu je i *Brněnská akademická počítačová síť* (BAPS), která je budována a rozšiřována od roku 1993 za podpory fondu Dynamického rozvoje a prostřednictvím páteřní sítě (ATM) a k ní přidružených sítí vybudovaných v městských lokalitách propojuje univerzity, pracoviště akademie věd, soudy, finanční úřady, instituce vlády, nemocnice a další zařízení splňující možnost připojení k síti. Za tuto dobu prošla její výstavba dvěma důležitými mezníky, těmi byly roky 1996 a 2001, kdy došlo ke zvýhodnění podmínek budování a jednalo se především o změnu v použitých typech optických kabelů, navýšení počtu vláken v kabelech a zejména o změnu v přístupu k realizaci rozšiřování sítě.

Na páteřní síti BAPS dojde, tedy spíše na její části, k navýšení počtu přenosových kanálů pomocí metody xWDM. Bude možné získat tak ze současných 2,5 Gb/s, kterými akademická síť disponuje, až 40 Gb/s.

Před samotnou aplikací xWDM je nutné provést sérii měření na vybraných trasách. Na ilustraci Příloha 1, na níž je sice zvýrazněno propojení nemocnic, avšak pro náš účel zcela vyhovující schéma, si představíme trasy Brněnské akademické počítačové sítě (BAPS), na kterých budou měření probíhat.

### **Proměřované trasy:**

MU-ÚVT, Botanická 68a – Rektorát MU, Žerotínovo nám. 9 – Soudní lékařství, Tvrdého 14

MU-ÚVT, Botanická 68a – MOÚ, Žlutý kopec 7 – Lipová

Lipová – Campus Bohunice

Campus Bohunice – Koleje Komárov

Rektorát MU, Žerotínovo nám. 9 – FF MU, Arne Nováka 1

Rektorát MU, Žerotínovo nám. 9 – Kovoterm, Cejl 20

Na těchto trasách byla provedena měření podle metod probraných v předchozích kapitolách. Jedná se o měření útlumu reflektometrickou metodou, polarizační vidové disperze (PMD) metodou skenování vlnové délky a interferometrickou metodou a chromatické disperze (CD) metodou fázového posuvu a metodou zpožděných impulsů v časové oblasti. Z principu těchto měření a vůbec optiky samotné lze měření provádět jak ve směru A → B

tak i v  $B \rightarrow A$ .

Z výsledků těchto měření a za pomoci výpočtů a srovnání byly vypracovány budoucí přenosové možnosti daných optických kabelů. Z grafů a výsledků měření se určí jakými rozptylovými hodnotami jednotlivá vlákna disponují.

Všechna proměřovaná optická vlákna musí splňovat příslušná doporučení a standardy jak je uvedeno v Tab. 3 a jaké hranici tolerancí se blíží. Měření by mělo probíhat v celém rozsahu pásma, tudíž zhruba na vlnové délce 1310 až 1550 nm. Při provádění měření je ale také důležité neopomenout konečnou délku 1625 nm, která je z pohledu stability přenosu nejkritičtější. Jelikož se jedná o optickou síť budovanou před rokem 2000, je zapotřebí proměřit vlákna na vlnové délce 1380 nm z důvodu výskytu skokového nárůstu disperze (water peak). Poslední vlákno ve svazku se většinou při měřících procedurách využívá jako komunikační kanál pro pokyny a synchronizaci v měření při nutnosti měření z obou stran vlákna

Na podkladě posouzení všech naměřených výsledků se stanoví závěry pro jednotlivé části sítě a jestliže dojde v některém případě k nedosažení předepsaných doporučení, budou zavedena aspoň protiopatření ve formě vyměnění některé z délek kabelu nebo kompenzací vláknem DSF.

Při samotném měření a provádění úkonů spojenými s měřením je potřeba mít na paměti, že jsou vlákna stářím velmi křehká a náchylná na lom, proto je třeba dbát při manipulaci s nimi velké opatrnosti. Také se doporučuje posoudit a zjistit druhy konektorů a jejich stav a případně je vyměnit.

S touto studií měření a vůbec se samotnou metodikou měření páteřních sítí souvisí i výběr vhodných měřících přístrojů, jak bude probráno v následujících kapitolách.

## **5.1 Seznámení s měřícími přístroji**

Jak už bylo předešle zmíněno, abychom byli schopni určit parametry páteřní sítě, je nutné k tomuto účelu použít i vhodné měřící přístroje. Pro účely měření na BAPS byly použity měřící přístroje výrobce *EXFO*.

Jelikož je převážná část těchto přístrojů ve formě modulů, je potřeba si nejprve představit měřící platformy, které data z těchto modulů zpracovávají. Po stručném představení přístrojů následuje shrnutí a zhodnocení parametrů.

## 5.1.1 Měřicí platformy

### Univerzální měřicí platforma EXFO FTB-400

Základní jednotka univerzálního měřicího systému FTB-400 je platformou vyhovující nejnáročnějším požadavkům. Jednotka poskytuje vysoký výkon pro běh více měřících aplikací (multitasking) a umožňuje vytváření integrovaných aplikací pro kombinovaná měření parametrů fyzické vrstvy optických tras (reflektometr, předřadné vlákno, přímá metoda, CD/PMD analyzátor, spektrální analyzátor) a protokolů (GbE/10GbE/IPTV/FiberChannel/SDH analyzátor apod.). Základní jednotka může být konfigurována pro umístění od dvou do osmi měřících modulů v závislosti na typu zadního modulu (2-slotový, 4-slotový, 7-slotový, 8-slotový zadní modul) [7].

Platforma umožňuje měřit všechny, pro naše potřeby důležité, parametry optických vláken v závislosti na použitých zadních nástavbách platformy, které umožňují efektivně kombinovat moduly. Kombinace modulů v zadních nástavbách může být jiná, nejčastěji podle typu sítě, pro kterou jsou daná měření určena. Některé nastavby jsou už samy o sobě vybaveny měřícím ústrojím různých parametrů.

	<b>FTB-400</b>
<b>Operační systém</b>	<b>MS Windows 2000</b>
<b>Paměť</b>	80 GB HD
<b>Disketová 3.5 mechanika</b>	interní
<b>Počet slotů pro moduly</b>	až 8
<b>Read/write CD-ROM</b>	externí
<b>Vstupní/Výstupní rozhraní</b>	RS-232, externí monitor, 2xUSB 1.1, Infrared (IrDA) port, Audio microphone In 3.5 mm, Audio speaker Out 3.5mm, 2xPCMCIA type II
<b>Dotyková obrazovka</b>	ano
<b>Úhlopříčka obrazovky</b>	12"
<b>Teplota okolí</b>	0 °C – 50 °C
<b>Výdrž baterie</b>	16 hodin

Tab. 4: Přehled parametrů měřicí platformy EXFO FTB-400 [7]

Příklad:

#### FTB-400, sedmi-slotová konfigurace

- rozšiřitelné základní a pokročilé aplikace pro testování optických vláken, včetně DWDM a disperzní analýzy
- více než 1000 testovacích kombinací - moduly chromatické disperze (CD), polarizační vidové disperze (PMD) a optického spektrálního analyzátoru (OSA), lišta testovací

sady, spínače pro testování mnohovláknových kabelů, OTDR a testování útlumu (celkem tedy 7 modulů v 7 slotech zadní nástavby) [7].

### **Kompaktní měřicí platforma EXFO FTB-200**

Kompaktní platforma EXFO FTB-200 je optimalizovaná pro měření, servis a analýzy optických a metalických sítí. Předností této platformy je nízká hmotnost, velký dotykový displej a modulární řešení.

Do platformy je možné integrovat 2 měřicí moduly pro měření parametrů fyzické vrstvy optických tras (reflektometr, předřadné vlákno, přímá metoda, CD/PMD analyzátor) nebo protokolů (GbE/10GbE/FiberChannel/SDH analyzátor apod.) [7].

	<b>FTB-200</b>
<b>Paměť</b>	80 MB
<b>Externí paměť</b>	> 1GB + Flash karty
<b>Počet slotů pro moduly</b>	2
<b>Read/write CD-ROM</b>	externí
<b>Výstupní/Výstupní rozhraní</b>	USB, RJ-45 LAN 10/100 Mbit/s, port pro konektor vlákna inspekční sondy
<b>Dotyková obrazovka</b>	ano
<b>Úhlopříčka obrazovky</b>	6"
<b>Teplota okolí</b>	-5 °C – 50 °C
<b>Výdrž baterie</b>	8 hodin
<b>Rozměry (VxŠxH)</b>	322 x 197 x 109 mm

*Tab. 5: Přehled parametrů kompaktní měřicí platformy EXFO FTB-200 [7]*

Dále jsou uvedeny měřicí moduly, s jejichž pomocí lze měřit parametry optických vláken dle probraných měřících metod společně s přehledem jejich parametrů, případně i ovládání. Jsou rozděleny do skupin jak podle měřících metod, tak i podle parametrů optických vláken, jaké jsou schopny měřit.

## 5.1.2 Měřicí modul chromatické disperze

### **Měřidlo chromatické disperze EXFO FTB-5800**

Měřicí modul EXFO FTB-5800 je 4-slotový měřicí modul do platformy EXFO FTB-400, který poskytuje rychlé a přesné měření chromatické disperze na optických trasách od středních vzdáleností (metropolitní optické trasy) až po extrémně dlouhé optické transportní trasy. Měřicí modul je připraven pro testování optických tras s přenosovou kapacitou 10 Gb/s, 40 Gb/s s výhledem na 100 Gb/s.

Měřicí modul využívá metodu fázového posuvu a pro měření je tedy nutné doplnit ho o modulovaný zdroj záření EXFO FLS-5800A. Přístroj umožňuje testování celé optické linky včetně EDFA zesilovačů bez nutnosti rozpojování na jednotlivé sekce a nabízí tak rychlé a bezchybné měření [7].

	<b>FTB-5800</b>
<b>Rozsah vlnových délek [nm]</b>	1200 až 1700
<b>Opakovatelnost bezdisperzní vlnové délky [nm]</b>	0,1 (20 km) 0,14 (80 km) 0,8 (120 km)
<b>Opakovatelnost poklesu disperze [%]</b>	0,03 (20 km) 0,05 (80 km) 0,25 (120 km)
<b>Absolutní přesnost vlnové délky [nm]</b>	0,1

Tab. 6: Přehled parametrů měřicího modulu chromatické disperze EXFO FTB-5800 [7]

## 5.1.3 Měřicí modul polarizační vidové disperze

### **Měřidlo polarizační vidové disperze EXFO FTB-5500B**

Měřicí modul EXFO FTB-5500B je 3-slotový měřicí modul do platformy EXFO FTB-400, který poskytuje rychlé a přesné měření PMD na optických trasách od středních vzdáleností (metropolitní optické trasy) až po extrémně dlouhé optické transportní trasy. Přístroj je vhodný pro testování podzemních i závěsných kabelů. Měřicí modul je schopen testovat optické trasy s přenosovou kapacitou 10 Gb/s, 40 Gb/s s výhledem na 100 Gb/s. Měřicí modul využívá tzv. obecnou interferometrickou metodu měření PMD (GINTY).

Jako polarizovaný zdroj záření je možné použít zdroj EXFO FTB-5800A, který pracuje i jako modulovaný zdroj záření pro měření chromatické disperze CD. Měřicí jednotku EXFO FTB-400 je tak možné osadit EXFO modulem pro měření CD a modulem pro měření PMD a vytvořit tak výkonnou sestavu pro testování disperzních charakteristik [7].

	<b>FTB-5500B</b>
Rozsah vlnových délek [nm]	1260 až 1675
Měřicí rozsah PMD [ps]	0 – 115
Citlivost [dBm]	-45
Dynamický rozsah [dB]	50
Doba měření [s]	5
Překlenutí EDFA zesilovačů	ano (až 120)

Tab. 7: Přehled parametrů měřicího modulu polarizační vidové disperze EXFO FTB-5500B [7]

## 5.1.4 Kombinované měřidlo CD/PMD

### Kombinované měřidlo CD/PMD EXFO FTB-5700

Měřicí modul EXFO FTB-5700 je unikátním typem analyzátoru pro kombinované jednosměrné měření disperzí CD a PMD (jediný přístroj svého druhu na trhu). Přístroj je vhodný pro měření na kratších až středně dlouhých optických trasách (do 140 km) bez zesilovačů. Měření se provádí tzv. jednosměrnou metodou (reflektometrickou), kdy odpadá nutnost použití zdroje záření na druhém konci. Výhodou tohoto EXFO modulu je dále také jeden měřicí port pro kombinované měření CD/PMD a tedy velice jednoduché nastavení a ovládání měření obou parametrů v jednom kroku s možností zobrazení indikace „vyhověl“/„nevyhověl“.

		<b>FTB-5700</b>
<b>CD</b>	Rozsah vlnových délek [nm]	1475 až 1625
	Opakovatelnost bezdisperzní vlnové délky [nm]	neuveđeno
	Opakovatelnost poklesu disperze [%]	neuveđeno
	Měřicí rozsah CD [ps/nm·km]	neuveđeno
	Dynamický rozsah [dB]	neuveđeno
	Doba měření [s]	40
	Neurčitost CD [ps/nm]	± 10
<b>PMD</b>	Rozsah vlnových délek [nm]	1260 až 1675
	Měřicí rozsah PMD [ps]	0,1 – 20
	Dynamický rozsah [dB]	neuveđeno
	Doba měření [s]	> 180
	Překlenutí EDFA zesilovačů	ano
	Neurčitost PMD [ps]	± (0,2 + 5% PMD)
	Opakovatelnost PMD [ps]	neuveđeno
<b>útlum</b>	Neurčitost vlnové délky [nm]	neuveđeno
	Dynamický rozsah [dB]	neuveđeno
	Doba měření [s]	neuveđeno

Tab. 8: Přehled parametrů kombinovaného měřidla CD/PMD EXFO FTB-5700 [7]

EXFO měřicí modul se vyrábí ve 2-slotovém provedení, je ho tedy možné integrovat nejen do měřicí jednotky EXFO FTB-400, ale také do malé přenosné kompaktní platformy EXFO FTB-200 vhodné pro měření v terénu [7].

### 5.1.5 Měřicí modul OTDR

#### **Moduly EXFO FTB-7400E/7500E - SM vlákna**

Moduly optického reflektometru EXFO řady E představují nejnovější typ OTDR s vysokým dynamickým rozsahem až 45 dB a s identifikační mrtvou zónou 0,8 m. Díky těmto parametrům nacházejí využití pro měření ve všech typech sítí (přístupové, metropolitní, dálkové trasy), kde jsou kladeny velké nároky na dynamický rozsah přístroje (např. měření přes splitters). 1-slotové modulární provedení umožňuje využití v univerzálních měřicích platformách EXFO FTB-200, FTB-400 nebo EXFO FTB-500 [7].

	<b>FTB-5740E</b>
<b>Vlnové délky [nm]</b>	1470 ± 3/1490 ± 3/1510 ± 3/ 1530 ± 3
<b>Dynamický rozsah [dB]</b>	41/41/41/41
<b>Identifikační mrtvá zóna [m]</b>	0,8
<b>Útlumová mrtvá zóna [m]</b>	4,5
<b>Šířka pulsu [nm], MM:</b>	5, 10, 30, 100, 275, 1000
<b>Šířka pulsu [nm], SM:</b>	5, 10, 30, 100, 275, 1000, 2500, 10000, 20000
<b>Vzorkovací body</b>	přes 256000

Tab. 9: Přehled parametrů měřicího modulu OTDR EXFO FTB-5740E [7]

### 5.1.6 Měřidlo útlumu

#### **Multifunkční měřidlo útlumu EXFO MaxTester FOT-930**

EXFO FOT-930 je multifunkční měřidlo útlumu (tzv. All in One) s funkcí měření FasTest. Jeho největší výhodou je, že provádí obousměrné měření útlumu na všech obsažených vlnových délkách včetně měření délky a útlumu odrazu během 10 s [7].

- měření útlumu odrazu (ORL)
- měření délky trasy

	<b>FOT-930</b>
Typ detektoru	InGaAs
Rozsah vlnových délek [nm]	800 – 1650
Dynamický rozsah [dBm]	0 až -80
Typ emitoru	laser
Vlnové délky [nm]	1310 ± 20, 1550 ± 20
Výstupní výkon [dBm]	-1,0
Vlnové délky [nm]	1310, 1550
Rozsah útlumu [dB]	60
Měřená délka [km]	až 200
Talk set + VFL	ano
Provozní doba [h]	9
Provozní teplota	-10 °C až 50 °C
Rozměry (VxŠxH) [mm]	250 x 125 x 75

Tab. 10: Přehled parametrů měřicího modulu útlumu EXFO FOT-930 [7]

### 5.1.7 Zdroj optického záření

#### Širokospektrální zdroj optického záření EXFO FLS-5800A

Širokospektrální zdroj optického záření EXFO FLS-5800A je polarizovaný, modulovaný vysoko-výkonový optický zdroj SLED, který byl vyvinut pro potřeby měření disperzí CD a PMD ve spojení s analyzátory FTB-5800 a FTB-5500B. Dále je vhodný pro měření DWDM kanálů nebo testování součástí [7].

	<b>FTB-5800A</b>
Vlnové délky [nm]	1580 ± 20
Výstupní výkon [dBm]	7
Přesnost výstupního výkonu [dB]	neuveďeno
Špičková spektrální hustota [dBm/nm]	> -12,5
Výkonová stabilita [dB]	< 0,075
Provozní teplota	0°C až 40°C

Tab. 11: Přehled parametrů zdroje optického záření EXFO FLS-5800A [7]

## 5.2 Provedená měření

Na trase *Campus Bohunice – Koleje Komárov* byla provedena řada měření, která mají za úkol zjistit současný stav sítě a zda je zmíněná trasa vhodná pro nasazení systémů WDM 256-STM. V přístupových prostorách jednotlivých uzlů byly za pomoci zapůjčených měřicích přístrojů firmy *EXFO* (viz. výše) změřeny klíčové parametry optické trasy a z naměřených dat byly vypracovány protokoly určující schopnosti 23-ti optických vláken typu NZDF G.652.

Určování měrného útlumu vláken probíhalo pomocí měřicího modulu *FTB-7400E* (5.1.5) umístěného v platformě *FTB-400* (5.1.1). Měření OTDR probíhalo jednosměrně, tudíž nebyl zapotřebí zdroj laserového záření. Proměřovány byly vlnové délky 1310, 1380, 1550 a 1625 nm pomocí přeladovaného laseru, který je obsažen v přístroji.

K měření ORL byla zapotřebí dvě měřidla *FOT-930* (5.1.6), kdy obě byla připojena na koncích jednoho vlákna a proměřovala tak vlákno obousměrně, tzv. měření OLTS (Optical Loss Test Set – Měření optického útlumu). *FTB-7400E* i *FOT-930* umí měřit délku optických vláken už z principu jejich funkce.

Hodnota chromatické disperze (CD) byla zjišťována jak modulem *FTB-5800* (5.1.2) v platformě *FTB-400/FTB-200* (5.1.1), tak i modulem *FTB-5700* (5.1.4) s platformou *FTB-400/FTB-200* (5.1.1). Oba přístroje zvládnou proměřit celé spektrum přenášeného světla, avšak stěžejním měřítkem je vlnová délka 1550 nm. *FTB-5800* vyhodnocuje přijatý signál z opačného konce vlákna, jako zdroj optického signálu byl použit laserový zdroj *FLS-5800A* (5.1.7).

Polarizační vidová disperze (PMD) byla proměřována kombinovaným měřidlem CD/PMD modulem *FTB-5700* v platformě *FTB-400*. Za pomoci obou měřidel CD i PMD bylo možné určit i přibližnou délku optické trasy.

### 5.2.1 Výstup z měřicích přístrojů

Platformy *FTB-400* a *FTB-200* umožňují vytvořit z naměřených hodnot s pomocí programu *FastReporter* (výrobce EXFO) přehledné protokoly obsahující tabulky naměřených hodnot, případně i grafy závislostí jednotlivých veličin.

Tabulky útlumu obsahují údaje jak z měření OLTS, tzn. útlum spojovacích a koncových částí vláken, tak i průběhu útlumu na optickém vlákne určeného díky měření OTDR. Jak již bylo uvedeno, zpětný odraz byl zjišťován obousměrně, proto tabulka uvádí hodnoty pro směr  $A \rightarrow B$  i  $B \rightarrow A$ , pro nás je ovšem určující zejména ta část v níž je uvedena výsledná hodnota ORL (Obr. 11).

ID vlákna	Vlnová délka (nm)	Útlum A->B (dB)	Ref. A->B (dB)	Útlum B->A (dB)	Ref. B->A (dB)	Průměr (dB)	ORL A (dB)	ORL B (dB)	Délka (km)
CAMP_KOMA_004	1310	3.02	0.19	3.03	0.98	3.03	33.25	30.36	8.425
	1490			1.98	0.86			27.59	
	1550	1.41	0.35	1.59	0.86	1.50	32.57	26.96	
	1625	1.43	0.30				32.56		
(20.11.2009 10:23:31)									

Obr. 11: Náhled tabulky z protokolu měření OLTS

Protokoly z měření OTDR jsou přehledně sestaveny z náměrů pro 4 vlnové délky vztažených vždy k jedné trase (Obr. 12). Ze změřeného útlumu a zjištěné délky optického vlákna je podle vztahu 4.2 vypočten měrný útlum vlákna. Nutno podotknout, že od naměřené délky optického vlákna je nutno odečíst vzdálenost přibližně 0,512 km, tzv. úroveň navázání (Obr. 13), jež není součástí skutečné trasy. Ztráta trasy (dB) je tak sice navýšena, ovšem ve výsledku dělená vyšší vzdáleností, tudíž na konečném výsledku se tento fakt neprojeví. Hodnota ORL trasy je zde pouze orientační, nelze ji použít jako určující.

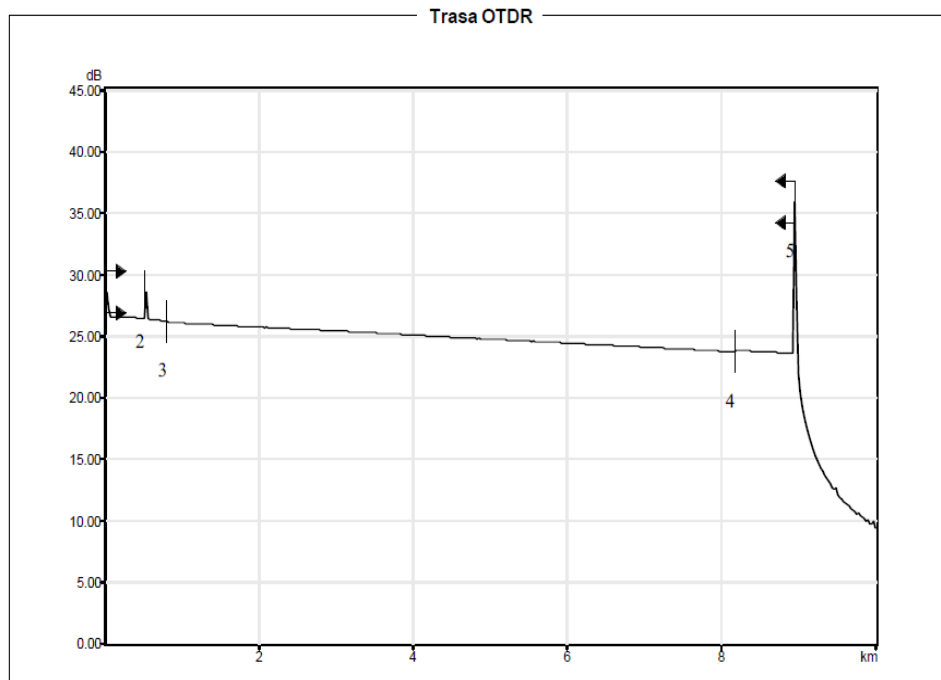
Měření trasy	
Ztráta trasy	: 3.475 dB
Rozpětí	: 8.9334 km
Průměrná ztráta	: 0.389 dB/km
Průměrný ztráta svaru	: ---
Max. ztráta spojení	: ---
ORL trasy	: 21.61 dB

Obr. 12: Náhled náměru OTDR pro 1310 nm

Dále je ve výstupu OTDR obsažen i graf závislosti útlumu trasy na vlnové délce (Obr. 14), který společně s tabulkou poruch optického vlákna (Obr. 13) tvoří obraz o skutečném fyzickém stavu vlákna.

Tabulka poruch						
Číslo	Pozice (km)	Typ poruchy	Útlum (dB)	Odraz (dB)	Mer. útl. (dB/km)	Kumul. (dB)
1	0.0000	Úroveň navázání	---	-54.2		0.000
2	0.5119	Vláknový úsek (0.5119 km)	0.170		0.332	0.170
		Událost s odrazem	0.112	-52.5		0.282
3	0.7838	Vláknový úsek (0.2719 km)	0.093		0.343	0.375
		Bezodrazová událost	0.116			0.491
4	8.1691	Vláknový úsek (7.3853 km)	2.406		0.326	2.897
		Zisková událost	-0.132			2.765
5	8.9364	Vláknový úsek (0.7673 km)	0.249		0.324	3.014
		Událost s odrazem	---	-14.2		3.014

Obr. 13: Tabulka poruch optického vlákna



Obr. 14: Graf závislosti útlumu na vlnové délce

Měření CD měřicím modulem *FTB-5700* byly získány její hodnoty v rozsahu 1475 až 1626 nm (Obr. 15 a Obr. 16). Určujícím faktorem tu opět zůstává vlnová délka 1550 nm. Součástí měření je i hodnota PMD a PMD koeficientu pro dané vlákno.

#### CD Results

Dispersion @ 1550 nm: **143,65 ps/nm**  
 Maximum dispersion: 177,78 ps/nm  
 Measured fiber length: 8428 m

#### Test Parameters

From: 1475 nm  
 To: 1626 nm

#### PMD Results

PMD: 0,04 ps  
 Coefficient: 0,0123 ps/km<sup>1/2</sup>  
 Measured fiber length: 8428 m

#### Test Parameters

From: 1471 nm  
 To: 1621 nm  
 Fiber type: Telecom

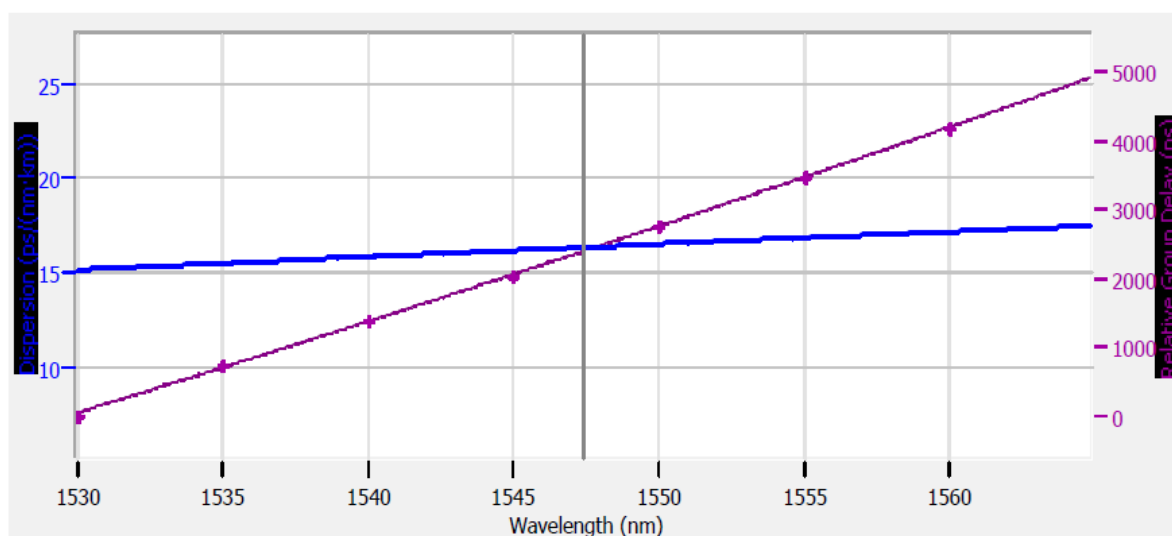
Obr. 15: Měření přístroje *FTB-5700*

CD Table

Wavelength (nm)	Dispersion (ps/nm)	Dispersion Coef. (ps/nm <sup>2</sup> ·km)
1475.00	105.76	12.55
1496.57	117.15	13.90
1518.14	128.13	15.20
1539.71	138.72	16.46
1561.28	148.96	17.68
1582.86	158.87	18.85
1604.43	168.47	19.99
1626.00	177.78	21.09

Obr. 16: Tabulka naměřených hodnot CD pomocí FTB-5700

Protokol měření CD modulem *FTB-5800* je oproti zprávě *FTB-5700* doplněn náhledem závislosti chromatické disperze a RGD (Relative Group Delay – Relativní skupinové zpoždění) na vlnové délce (Obr. 17), oba parametry jsou proměřeny pouze v rozsahu 1530 až 1560 nm (Obr. 18). Jelikož se jedná o lineární závislost, je možné uvažovat, že tento trend bude v celém spektru vlnových délek.



Obr. 17: Závislosti CD a RGD na vlnové délce

Results Table

Used	Wavelength (nm)	RGD (ps)	Fitted RGD (ps)	RGD Deviation (ps)	Pass/Fail	Dispersion ps/nm	Pass/Fail	Dispersion ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
Yes	1530.0	0.00	57.578	57.578	---	128.935	---	15.169
Yes	1535.0	733.02	709.537	23.487	---	131.845	---	15.511
Yes	1540.0	1388.15	1375.985	12.163	---	134.731	---	15.851
Yes	1545.0	2038.63	2056.803	18.174	---	137.593	---	16.187
Yes	1550.0	2756.08	2751.872	4.204	---	140.431	---	16.521
Yes	1555.0	3465.19	3461.078	4.112	---	143.247	---	16.853
Yes	1560.0	4182.18	4184.306	2.123	---	146.040	---	17.181

Obr. 18: Tabulka naměřených hodnot CD pomocí FTB-5800

### 5.3 Určení schopností vláken z provedených měření

Určení schopností a možností optické trasy je prováděno na základě výstupu z měřicích přístrojů a porovnání hodnot naměřených veličin s limitními hodnotami těchto veličin určenými pro konkrétní druh sítě s ohledem na použité prvky sítě a použité přenosové rychlosti.

Dále je pro každé proměřované optické vlákno v tabulkách uveden souhrn nejpodstatnějších údajů ze získaných protokolů. Grafy pak popisují průběh některých veličin spektrem vlnových délek. Výsledky jsou seřazeny podle identifikačních jmen vláken, některá nebyla z důvodu předpokládané nevhodnosti pro přechod na vyšší rychlosti proměřována vůbec. Odhad počtu vhodných optických vláken se pohybuje okolo 30 % z celkového proměřovaného množství.

Pro porovnání naměřených hodnot s limitními je potřeba menší shrnutí již zmíněných maximálních hodnot každé veličiny:

	<i>ORL</i>	<i>Měrný útlum</i>	<i>CD</i>	<i>PMD</i>
<i>Maximální úroveň</i>	27 dB	Tab. 2	0,4 dB/km (1310-1625 nm) 0,3 dB/km (1550 nm)	0,2 ps/√km
<i>Doporučení</i>	ITU-T G.952	ITU-T G.652	ITU-T G.652	ITU-T G.691 GR-1312-CORE
<i>Odkaz</i>	Strana 18	Strana 12	Strana 19	Strana 16

Legenda ke grafům závislosti koeficientu CD na vlnové délce:

- **Maximální dovolená hodnota CD (Tab. 2)**
- **Naměřená CD (FTB-5800; reflektometrická metoda)**
- - - **Proměření CD v oblasti 1550 nm (FTB-5700; metoda fázového posuvu)**

#### Vlákno č. 1 (CAMP\_COMA\_003)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_003	1310	3,15	32,84	30,48	8,425	2,903	0,325	8,9351
	1380					3,556	0,398	8,9334
	1550	1,65	32,43	27,00		1,765	0,198	8,9338
	1625		32,47			1,851	0,207	8,9339

Tab. 12: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.1

- vyhovující zpětný odraz spojek

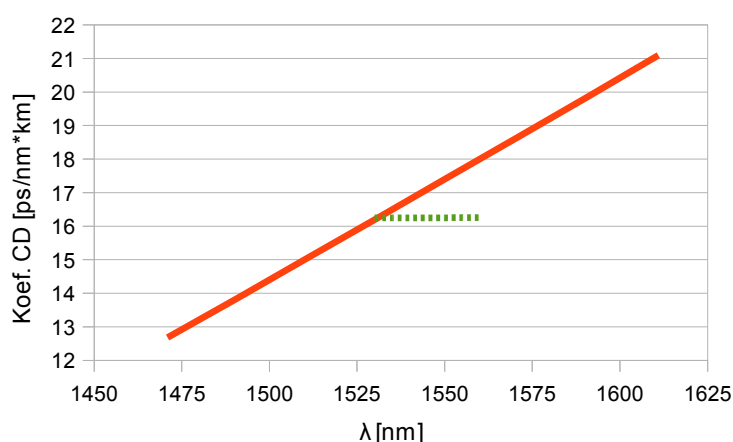
- vyhovující měrný útlum optického vlákna i na vlnové délce 1380 nm
- CD a PMD u tohoto vlákna nezjišťovány

### Vlákno č. 2 (CAMP\_COMA\_004)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_004	1310	3,03	33,25	30,36	8,425	3,226	0,361	8,9338
	1380					3,475	0,389	8,9334
	1550	1,50	32,57	26,96		1,996	0,223	8,9338
	1625		32,56			2,112	0,236	8,9326

Tab. 13: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.2

- ORL spojek je vyhovující, odchylka na 1550 nm je v toleranci, jedná-li se o konektor UPC
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující i v kritické oblasti 1380 nm
- CD v oblasti 1550 nm se zdá v toleranci, avšak ze sklonu křivky lze odvodit, že ve zbytku spektra pod 1550 nm se již CD chová nevyhovujícím způsobem, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD tohoto optického vlákna nebyla určována



Obr. 19: Závislost koef. CD vlákna č.2 na vlnové délce

### Vlákno č. 3 (CAMP\_COMA\_010)

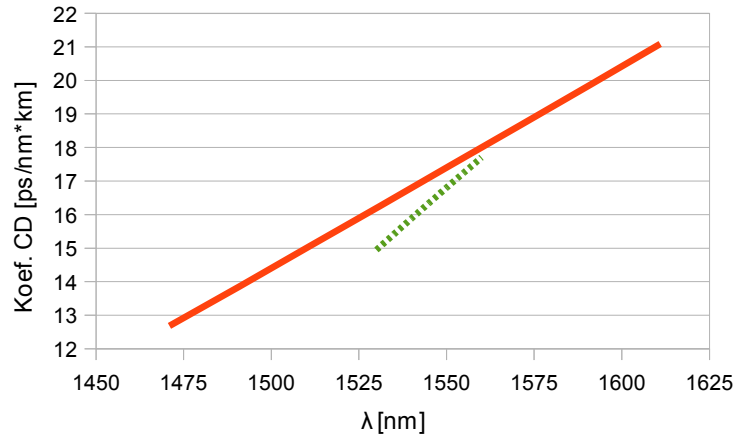
ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_010	1310	3,44	16,84	13,47	8,426			
	1380							
	1550	1,98	16,91	14,40				
	1625		18,74					

Tab. 14: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.3

- ORL optické trasy v obou směrech je naprosto nevyhovující, nespadá do tolerance

žádných konektorů

- měrný útlum trasy nebyl zjišťován
- CD je vyhovující, z trendu lineárního nárůstu lze uvažovat nevhodnost přenosu pro vlnové délky nad 1560 nm, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD pro toto vlákno nebyla zjišťována



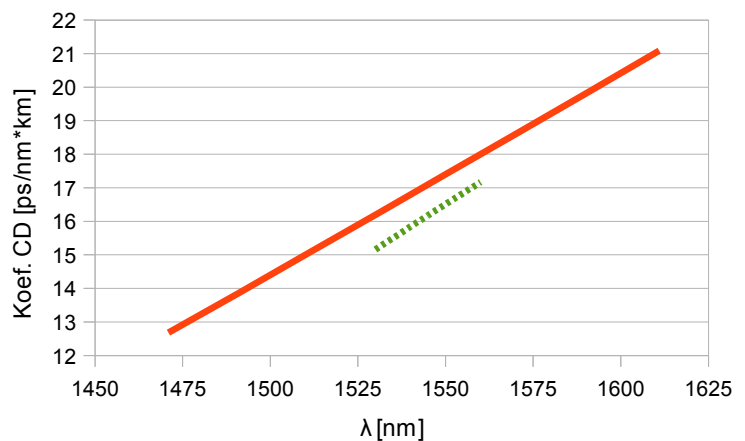
Obr. 20: Závislost koef. CD vlákna č.3 na vlnové délce

#### Vlákno č. 4 (CAMP\_COMA\_011)

ID vlákna	λ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_011	1310	3,03	33,25	30,36	8,427	3,014	0,337	8,9364
	1380					3,604	0,403	8,9347
	1550	1,50	32,57	26,96		1,787	0,200	8,9351
	1625		32,56			1,904	0,213	8,9339

Tab. 15: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.4

- ORL vlákna je i s mírnou odchylkou na vlnové délce 1550 nm postačující
- měrný útlum vlákna překračuje limit na vlnové délce 1380 nm, tento jev je předpokládán
- z trendu lineárního růstu CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze předpokládat vyhovující stav v celém proměřovaném spektru, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



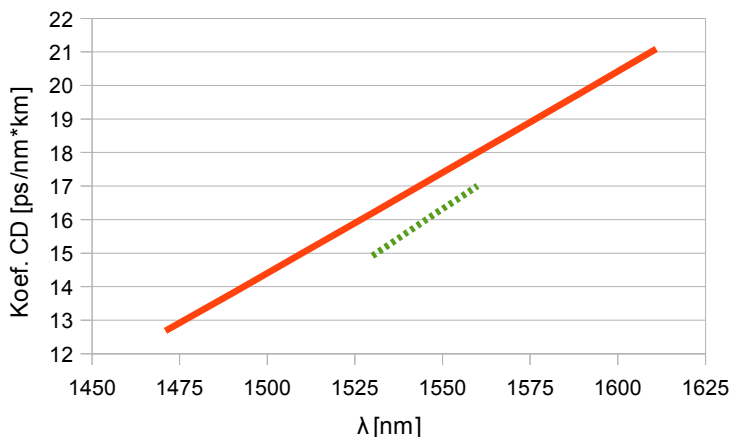
Obr. 21: Závislost koef. CD vlákna č.4 na vlnové délce

### Vlákno č. 5 (CAMP\_COMA\_012)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_012	1310	3,21	24,20	28,06	8,426	3,109	0,348	8,9364
	1380					3,419	0,383	8,9347
	1550	1,74	19,34	22,52		1,889	0,211	8,9351
	1625		21,58			2,008	0,225	8,9339

Tab. 16: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.5

- ORL optického vlákna je převážně nevyhovující
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující i v kritické oblasti 1380 nm
- z trendu lineárního růstu CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze předpokládat vyhovující stav v celém proměřovaném spektru, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



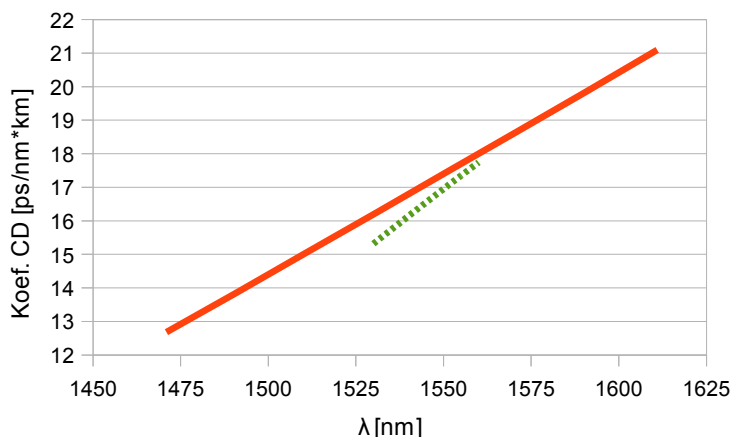
Obr. 22: Závislost koef. CD vlákna č.5 na vlnové délce

### Vlákno č. 6 (CAMP\_COMA\_013)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_013	1310	3,21	30,86	30,05	8,426	3,062	0,343	8,9364
	1380					3,469	0,388	8,9360
	1550	1,71	19,96	23,23		1,838	0,206	8,9364
	1625		20,92			1,957	0,219	8,9352

Tab. 17: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.6

- ORL spojky pro toto vlákno je nevyhovující na vlnových délkách 1550 a 1625 nm
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek i na kritické hodnotě 1380 nm
- z trendu lineárního růstu CD tohoto vlákna se dá usuzovat, že v rozmezí nad 1560 nm nebude již CD v toleranci, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



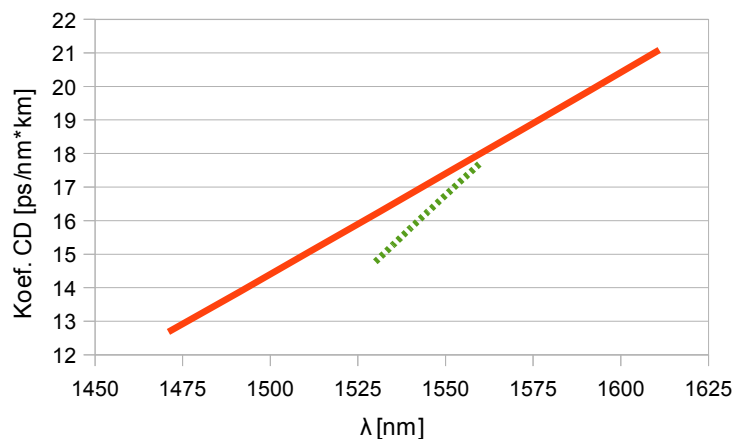
Obr. 23: Závislost koef. CD vlákna č.6 na vlnové délce

### Vlákno č. 7 (CAMP\_COMA\_014)

ID vlákna	λ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_014	1310	2,88	31,11	30,10	8,427	3,160	0,354	8,9351
	1380					3,470	0,388	8,9347
	1550	1,50	19,33	22,72		1,980	0,222	8,9351
	1625		20,25			2,158	0,242	8,9339

Tab. 18: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.7

- ORL spojek pro toto vlákno je nevyhovující pro vlnové délky 1550 a 1625 nm
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek i na kritické hodnotě 1380 nm
- z trendu lineárního růstu CD tohoto vlákna se dá usuzovat, že v rozmezí nad 1560 nm nebude již CD v toleranci, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



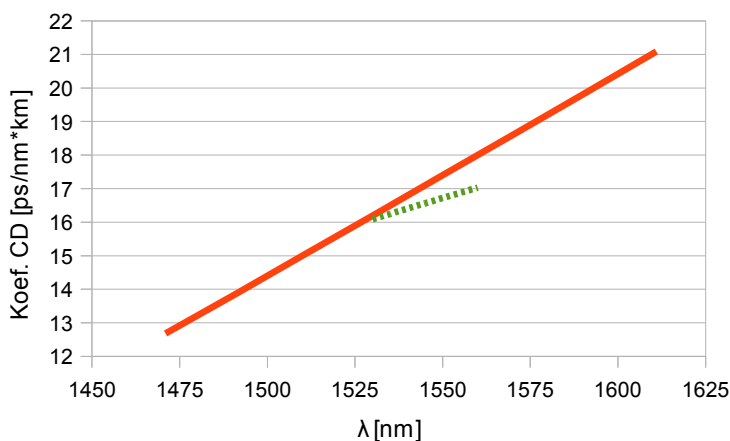
Obr. 24: Závislost koef. CD vlákna č.7 na vlnové délce

### Vlákno č. 8 (CAMP\_COMA\_015)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_015	1310	3,69	21,46	27,14	8,426	3,046	0,341	8,9351
	1380					3,662	0,410	8,9347
	1550	2,08	19,27	22,26		1,842	0,206	8,9351
	1625		22,19			1,999	0,224	8,9339

Tab. 19: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.8

- ORL optického vlákna je převážně nevyhovující
- na vlnové délce 1380 nm došlo k předpokládanému překročení limitu pro CD
- CD v oblasti 1550 nm se zdá v toleranci, avšak ze sklonu křivky lze odvodit, že se CD ve zbytku spektra pod úrovní 1550 nm již dostává do nevyhovujících hodnot, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



Obr. 25: Závislost koef. CD vlákna č.8 na vlnové délce

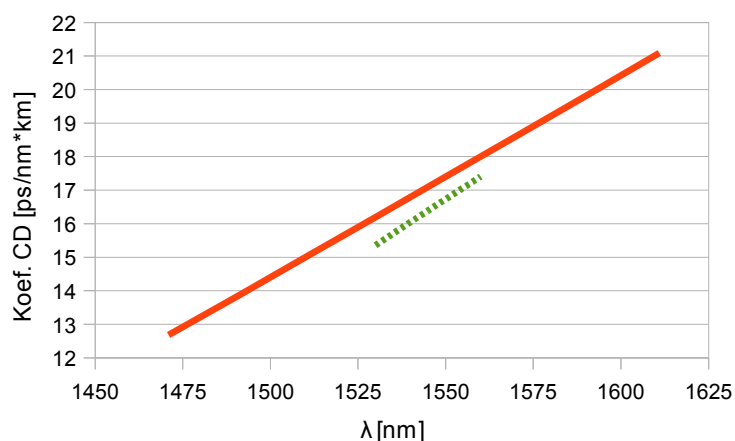
### Vlákno č. 9 (CAMP\_COMA\_016)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_016	1310	2,94	21,69	26,08	8,426	3,395	0,380	8,9338
	1380					3,876	0,434	8,9334
	1550	1,50	19,37	22,83		2,512	0,281	8,9338
	1625		22,05			2,400	0,269	8,9326

Tab. 20: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.9

- z hlediska ORL spoj je tento spoj naprosto nevyhovující
- na vlnové délce 1380 nm došlo k předpokládanému překročení limitu měrného útlumu
- podle trendu vývoje charakteristiky pro CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze usuzovat i nadále příznivý vývoj bez překročení toleranční meze, reflektometrická metoda zde nebyla provedena

- PMD nebyla určována

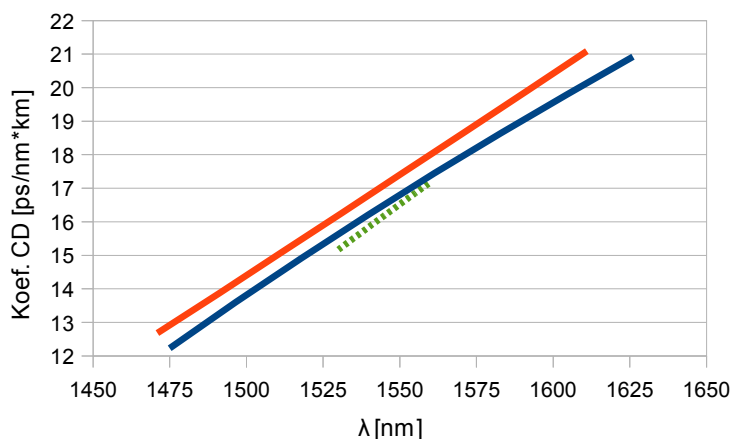


Obr. 26: Závislost koef. CD vlákna č.9 na vlnové délce

### Vlákno č. 10 (CAMP\_COMA\_017)

ID vlákna	λ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_017	1310	3,22	20,68	25,43	8,426	3,373	0,377	8,9351
	1380					3,286	0,368	8,9347
	1550	1,63	19,70	22,57		1,998	0,224	8,9351
	1625		22,99			2,101	0,235	8,9339

Tab. 21: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.10



Obr. 27: Závislost koef. CD vlákna č.10 na vlnové délce

**PMD: 0,08 ps**

**Koeficient PMD: 0,0278 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**

- ORL spojek z obou směrů je pro tento spoj zcela nevyhovující
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek i na kritické hodnotě

1380 nm

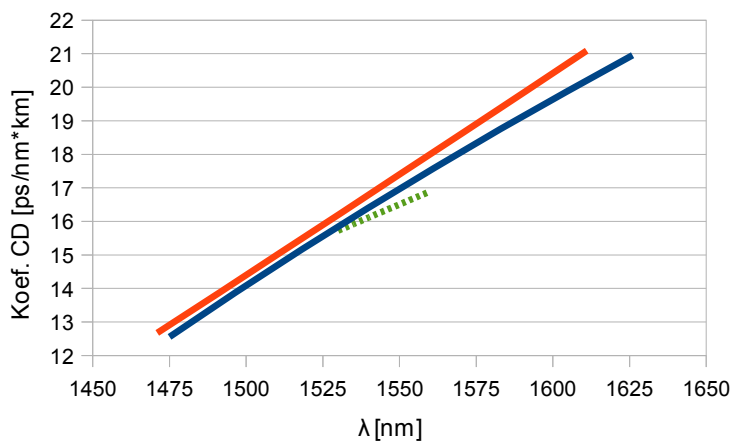
- z trendu lineárního růstu CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze pokládat naměřené hodnoty pomocí metody fázového posuvu za vyhovující
- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující

- vypočtený koeficient PMD má dostatečné rezervy

### Vlákno č. 11 (CAMP\_COMA\_018)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_018	1310	2,87	22,53	26,95	8,426	2,974	0,333	8,9351
	1380					3,230	0,362	8,9347
	1550	1,49	19,26	21,84		1,798	0,201	8,9351
	1625		21,86			1,888	0,211	8,9339

Tab. 22: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.11



Obr. 28: Závislost koef. CD vlákna č.11 na vlnové délce

**PMD: 0,08 ps**

**Koeficient PMD: 0,0270 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**

- ORL spoj je pro tento spoj převážně nevyhovující
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek i na kritické 1380 nm
- z trendu lineárního růstu

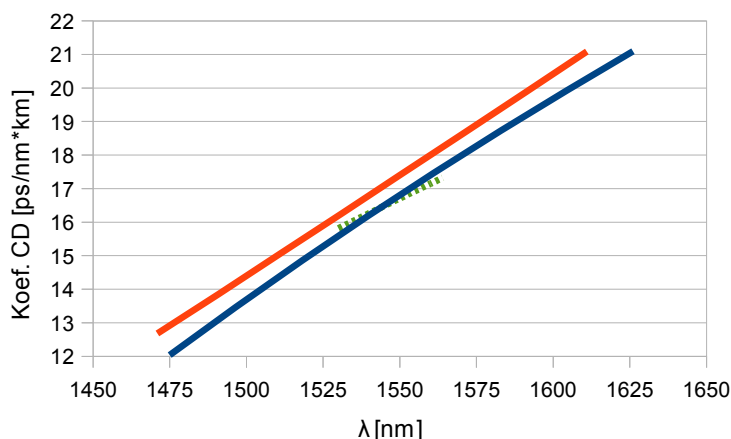
CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze pokládat naměřené hodnoty pomocí metody fázového posuvu za vyhovující

- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující
- vypočtený koeficient PMD má dostatečné rezervy

### Vlákno č. 12 (CAMP\_COMA\_019)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_019	1310	3,48	20,33	25,88	8,426	2,856	0,320	8,9364
	1380					3,483	0,390	8,9347
	1550	1,87	19,79	23,47		1,701	0,190	8,9351
	1625		23,34			1,787	0,200	8,9339

Tab. 23: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.12



Obr. 29: Závislost koef. CD vlákna č.12 na vlnové délce

**PMD: 0,03 ps**

**Koeficient PMD: 0,0111 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**

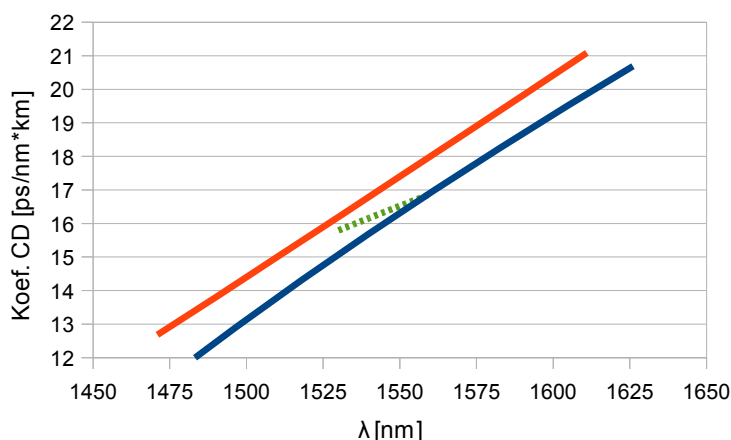
- ORL spojek z obou směrů je pro tento spoj zcela nepoužitelné
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek i na kritické hodnotě 1380 nm

- z trendu lineárního růstu CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze pokládat naměřené hodnoty pomocí metody fázového posuvu za vyhovující, v oblasti přibližně do 1500 nm za mírně nevyhovující
- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující
- vypočtený koeficient PMD má dostatečné rezervy

### Vlákno č. 13 (CAMP\_COMA\_020)

ID vlákna	λ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_020	1310	3,38	26,98	29,13	8,427	2,967	0,332	8,9351
	1380					3,268	0,366	8,9347
	1550	1,83	19,16	23,03		1,847	0,207	8,9351
	1625		20,78			1,963	0,220	8,9339

Tab. 24: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.13



Obr. 30: Závislost koef. CD vlákna č.13 na vlnové délce

**PMD: 0,08 ps**

**Koeficient PMD: 0,0264 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**

- ORL optické trasy je pro vlnové délky vyšší než 1550 nm zcela nevyhovující
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek

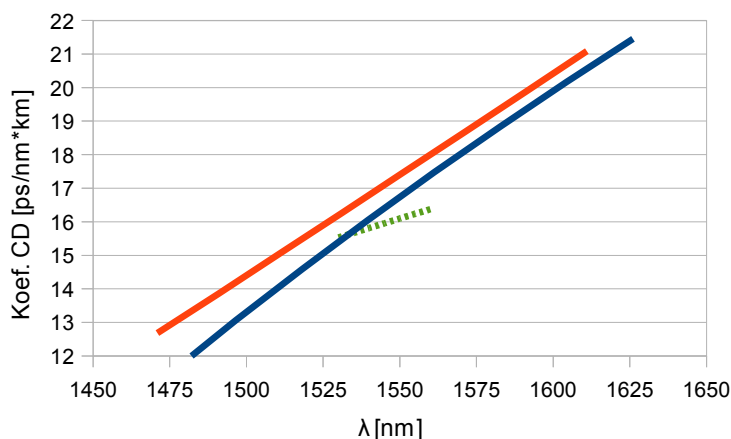
délek i na kritické hodnotě 1380 nm

- z trendu lineárního růstu CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze pokládat naměřené hodnoty pomocí metody fázového posuvu za vyhovující, v oblasti přibližně do 1500 nm za nevyhovující
- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující
- vypočtený koeficient PMD má dostatečné rezervy

### Vlákno č. 14 (CAMP\_COMA\_021)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_021	1310	3,42	20,79	26,37	8,426	3,191	0,357	8,9351
	1380					3,594	0,402	8,9347
	1550	1,77	19,60	23,40		1,933	0,216	8,9351
	1625		23,04			2,020	0,226	8,9339

Tab. 25: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.14



Obr. 31: Závislost koef. CD vlákna č.14 na vlnové délce

**PMD: 0,15 ps**

**Koeficient PMD: 0,0520 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**

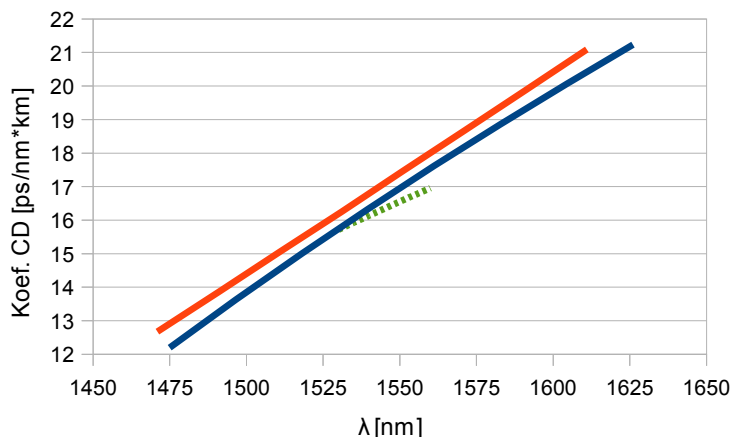
- ORL spojek optické trasy je v obou směrech zcela nevyhovující
- na vlnové délce 1380 nm došlo k nepatrnému i když předpokládanému překročení limitu měrného útlumu

- z trendu lineárního růstu CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze pokládat naměřené hodnoty pomocí metody fázového posuvu za vyhovující, v oblasti přibližně do 1500 nm za nevyhovující
- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující
- vypočtený koeficient PMD má dostatečné rezervy

### Vlákno č. 15 (CAMP\_COMA\_022)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_022	1310	3,15	20,92	25,74	8,426	3,048	0,341	8,9364
	1380					3,413	0,382	8,9347
	1550	1,61	19,88	22,56		1,823	0,204	8,9351
	1625		23,31			1,929	0,216	8,9352

Tab. 26: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.15



Obr. 32: Závislost koef. CD vlákna č.15 na vlnové délce

**PMD: 0,03 ps**

**Koeficient PMD: 0,0110 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**

- ORL spojek optické trasy je v obou směrech zcela nevyhovující
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek i na kritické hodnotě

1380 nm

- z trendu lineárního růstu CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze pokládat naměřené hodnoty pomocí metody fázového posuvu za vyhovující, v oblasti přibližně do 1500 nm za nevyhovující
- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující
- vypočtený koeficient PMD vykazuje dostatečné rezervy

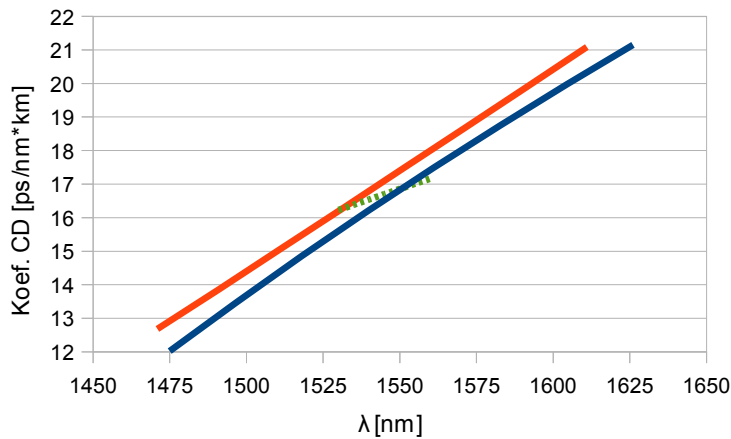
### Vlákno č. 16 (CAMP\_COMA\_023)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_023	1310	3,58	25,01	29,12	8,425	3,220	0,360	8,9351
	1380					3,718	0,416	8,9347
	1550	1,98	20,06	24,18		2,308	0,258	8,9351
	1625		22,26			2,270	0,254	8,9339

Tab. 27: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.16

**PMD: 0,04 ps**

**Koeficient PMD: 0,0123 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**



Obr. 33: Závislost koef. CD vlákna č.16 na vlnové délce

limit přibližně do vlnové délky 1530 nm

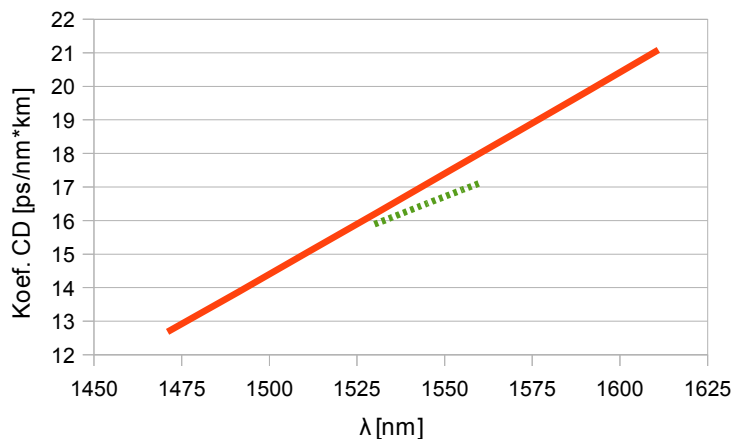
- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující
- vypočtený koeficient PMD vykazuje dostatečné rezervy

#### Vlákno č. 17 (CAMP\_COMA\_024)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_024	1310	3,62	19,63	23,63	8,424	3,253	0,364	8,9338
	1380					3,829	0,429	8,9334
	1550	2,63	12,55	9,90		2,166	0,242	8,9338
	1625		13,25			2,340	0,262	8,9326

Tab. 28: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.17

- z hlediska ORL spoj je tento spoj naprosto nevyhovující v obou směrech
- na vlnové délce 1380 nm došlo k předpokládanému překročení limitu měrného útlumu
- podle trendu vývoje charakteristiky pro CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze usuzovat nepříznivé překročení toleranční meze na vlnových délkách 1530 nm, reflektometrická metoda zde



Obr. 34: Závislost koef. CD vlákna č.17 na vlnové délce

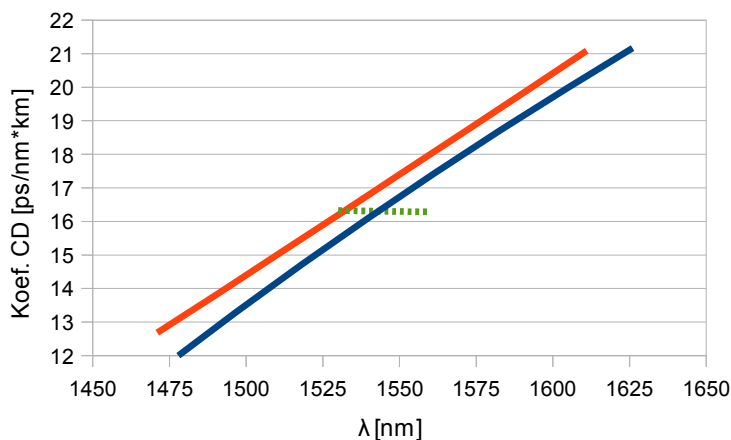
nebyla provedena

- PMD nebyla určována

### Vlákno č. 18 (CAMP\_COMA\_025)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_025	1310	3,09	32,56	30,25	8,427	3,360	0,376	8,9364
	1380					3,310	0,370	8,9360
	1550	1,57	32,02	26,84		2,083	0,233	8,9364
	1625		32,10			2,198	0,246	8,9352

Tab. 29: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.18



Obr. 35: Závislost koef. CD vlákna č.18 na vlnové délce

**PMD: 0,03 ps**

**Koeficient PMD: 0,0117 ps /  $\sqrt{\text{km}}$**

- z pohledu ORL spoje je tento spoj vyhovující i s menší odchylkou na vlnové délce 1550 nm
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových

dělek i na kritické hodnotě 1380 nm

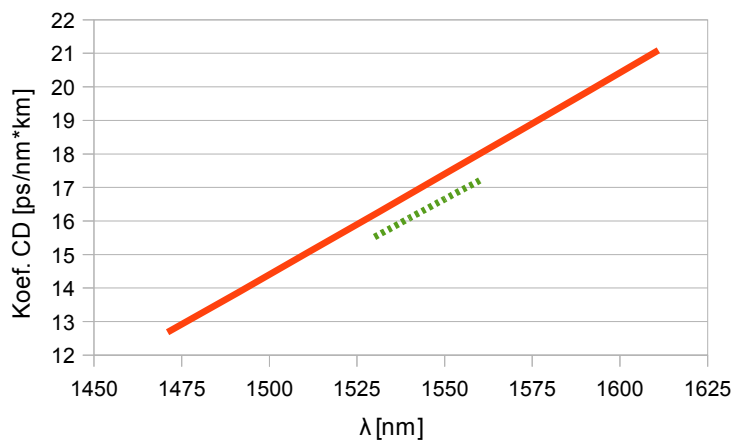
- CD v oblasti 1550 nm se zdá v toleranci, avšak ze sklonu křivky lze odvodit, že ve zbytku spektra pod 1550 nm se již CD chová nevyhovujícím způsobem
- naměřený průběh CD v závislosti na vlnové délce pomocí reflektometrické metody nepřekračuje povolené limity a je tudíž vyhovující
- vypočtený koeficient PMD vykazuje dostatečné rezervy

### Vlákno č. 19 (CAMP\_COMA\_026)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_026	1310	3,56	10,12	16,89	8,427	3,784	0,423	8,9364
	1380					4,074	0,456	8,9360
	1550	1,89	10,82	15,31		2,758	0,309	8,9364
	1625		11,24			2,283	0,256	8,9352

Tab. 30: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.19

- z hlediska ORL spoj je tento spoj naprosto nevyhovující v obou směrech
- na vlnové délce 1380 nm došlo k předpokládanému překročení limitu měrného útlumu, výjimečně však i na 1310 a 1550 nm
- podle trendu vývoje charakteristiky pro CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze usuzovat i nadále příznivý vývoj bez překročení toleranční meze, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



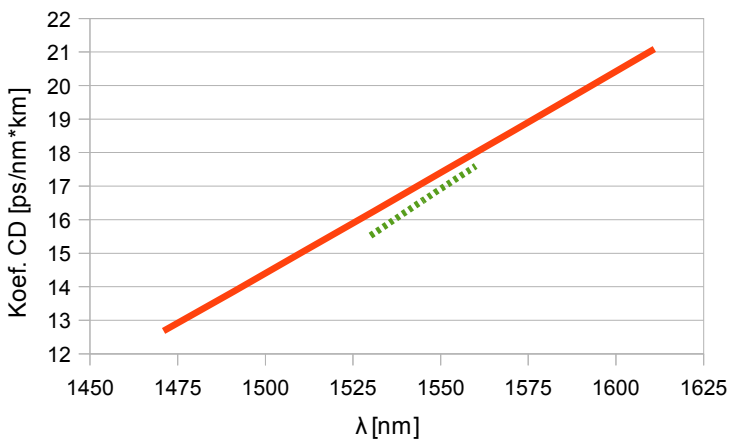
Obr. 36: Závislost koef. CD vlákna č.19 na vlnové délce

### Vlákno č. 20 (CAMP\_COMA\_027)

ID vlákna	λ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_027	1310	2,95	33,26	30,44	8,429	3,155	0,353	8,9377
	1380					3,740	0,418	8,9373
	1550	1,45	32,42	26,94		1,947	0,218	8,9377
	1625		32,45			2,068	0,231	8,9365

Tab. 31: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.20

- z hlediska ORL spoj je tento spoj i na odchylku na vlnové délce 1550 nm vyhovující
- na vlnové délce 1380 nm došlo k předpokládanému překročení limitu měrného útlumu
- podle trendu vývoje charakteristiky pro CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze usuzovat i nadále příznivý vývoj bez překročení toleranční meze, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



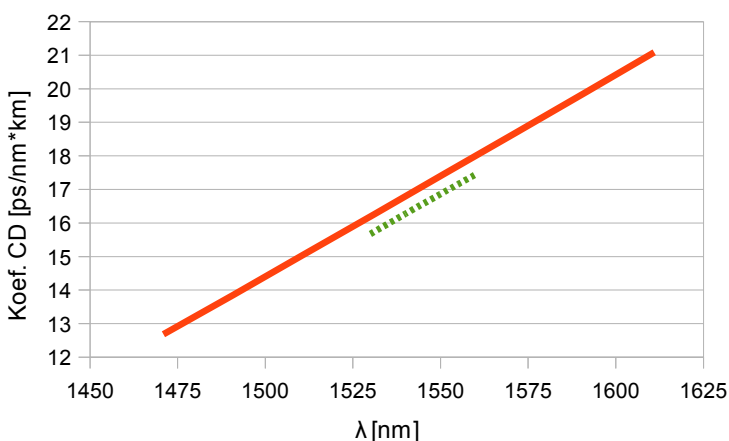
Obr. 37: Závislost koef. CD vlákna č.20 na vlnové délce

### Vlákno č. 21 (CAMP\_COMA\_028)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_028	1310	3,03	33,06	30,61	8,428	3,294	0,369	8,9377
	1380					3,517	0,394	8,9373
	1550	1,53	32,43	26,98		2,085	0,233	8,9377
	1625		32,54			2,179	0,244	8,9365

Tab. 32: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.21

- z hlediska ORL spojek je tento spoj i na odchytku na vlnové délce 1550 nm vyhovující
- měrný útlum optického vlákna je vyhovující v celém rozsahu vlnových délek i na kritické hodnotě 1380 nm
- podle trendu vývoje charakteristiky pro CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze usuzovat i nadále příznivý vývoj bez překročení toleranční meze, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



Obr. 38: Závislost koef. CD vlákna č.21 na vlnové délce

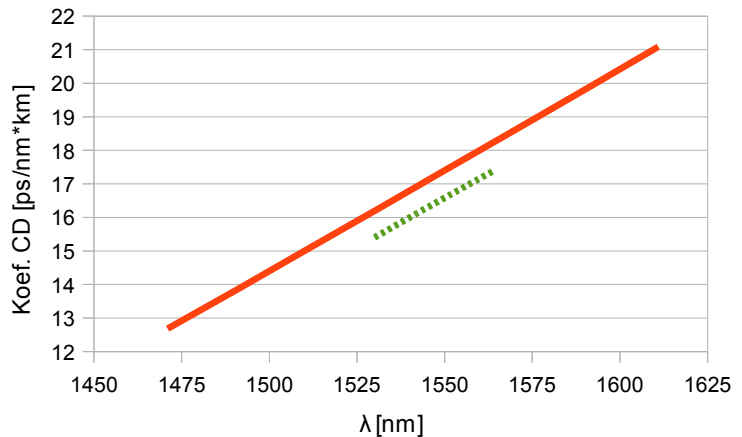
### Vlákno č. 22 (CAMP\_COMA\_031)

ID vlákna	$\lambda$ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_031	1310	3,98	33,78	31,19	8,428	2,948	0,330	8,9364
	1380					3,680	0,412	8,9360
	1550	2,27	33,17	27,14		1,760	0,197	8,9364
	1625		33,41			1,917	0,215	8,9352

Tab. 33: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.22

- ORL spojek je zcela vyhovující

- na vlnové délce 1380 nm došlo k předpokládanému překročení limitu měrného útlumu
- podle trendu vývoje charakteristiky pro CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze usuzovat i nadále příznivý vývoj bez překročení toleranční meze, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



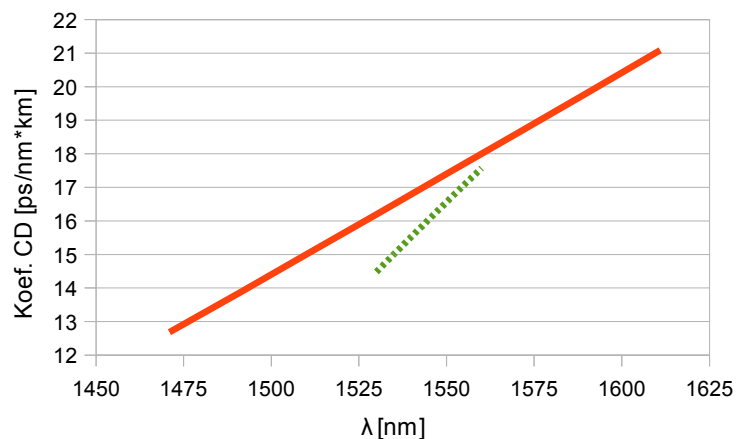
Obr. 39: Závislost koef. CD vlákna č.22 na vlnové délce

### Vlákno č. 23 (CAMP\_COMA\_032)

ID vlákna	λ [nm]	OLTS				OTDR		
		Útlum [dB]	ORL -A [dB]	ORL -B [dB]	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Délka [km]
CAMP_COMA_032	1310	3,60	34,72	30,46	8,426	3,010	0,337	8,9351
	1380					3,611	0,404	8,9347
	1550	1,89	33,47	26,95		1,805	0,202	8,9351
	1625		33,35			1,940	0,217	8,9339

Tab. 34: Naměřené hodnoty OLTS a OTDR pro vlákno č.23

- ORL spojek je i na menší odchylku na vlnové délce 1550 nm vyhovující
- na vlnové délce 1380 nm došlo k předpokládanému překročení limitu měrného útlumu
- podle trendu lineárního růstu charakteristiky pro CD v okolí vlnové délky 1550 nm lze předpokládat nepříznivé překročení toleranční meze přibližně pro vlnové délky nad 1580 nm, reflektometrická metoda zde nebyla provedena
- PMD nebyla určována



Obr. 40: Závislost koef. CD vlákna č.23 na vlnové délce

## **5.4 Shrnutí výsledků měření**

Porovnáním naměřených hodnot s limitními hodnotami každé měřené veličiny byl získán obraz současného stavu části Brněnské akademické počítačové sítě a podklady pro určení vhodnosti o případném přechodu na vyšší přenosové rychlosti, konkrétně 40 Gb/s.

### **Zpětný odraz**

Z přehledu naměřených hodnot ORL pro spojky a konektory použité na konkrétní trase tvořené optickým vláknem je patrné, že v tolerovaném limitu se nachází jen mizivé procento spojů. Linky s hodnotou blíží se v jednom směru limitu 27 dB jsou považovány za dostačující, avšak tento fakt i tak předurčuje spoj k provedení jistých opatření, týkajících se omezení ORL. Dojde-li k překročení meze zpětného odrazu, děje se tak převážně na vyšší vlnové délce, v tomto případě na 1550 a 1625 nm. Obvyklejším jevem je však alarmující počet překročení limitu zpětného rozptylu v obou směrech linky na všech vlnových délkách.

Uvážením faktu, že síť byla budována před rokem 2000, lze říci, že na vině je jak nevhodný stav spojek, tak nevhodný stav některých vláken. Z hodnot spojů s vyhovujícím ORL spojek lze soudit, že jsou na trase použity konektory typu UPC s hodnotou zpětného odrazu mezi 35 a 55 dB. Jsou-li tyto konektory použity i na linkách s nevyhovující hodnotou, pak by bylo vhodné zkusit zredukovat tento stav zavedením konektorů APC. Napomůže-li ani tato modifikace, pak je na vině stav optického vlákna a tudíž je nutné vyměnit část kabelové trasy, v nejzazším případě celé vlákno.

### **Měrný útlum optického vlákna**

Z pohledu měrného útlumu optického vlákna je většina proměřených tras vyhovujících, výjimku tvoří vlákno č. 19, které překračuje povolený limit na vlnové délce 1310 a 1550 nm. Určování měrného útlumu na vlnové délce 1380 nm slouží pouze k informativním účelům, jelikož vlivem OH radikálů v optickém vlákne patří tato vlnová délka k nevhodným pro přenos, tudíž překročení limitu měrného útlumu je na této vlnové délce předvídatelný jev. V případě že nedojde k překročení hranice 0,4 dB/km, je přenos na vlnové délce 1380 nm možný, avšak s velkým rizikem možného výkyvu kvality signálu.

### **Délka trasy**

Jelikož všechna proměřovaná optická vlákna tvoří jednu trasu, jsou změřené délky vláken pro každou vlnovou délku v každé měřicí metodě stejné, lišící se pouze v jednotkách metrů. Jak již bylo zmíněno, metoda OTDR připočítává k měřené trase navíc délku navázání, což v tomto případě činí přibližně 0,512 km. Je tedy možné říci, že délky vláken naměřené metodou OLTS a OTDR jsou přibližně stejné.

## ***Chromatická disperze***

Hodnoty chromatické disperze, ať už měřené metodou fázového posuvu nebo reflektometrickou metodou, byly porovnávány v grafu závislosti CD na vlnové délce s křivkou představující limitní hodnotu CD pro daný systém. Vlákná proměřená reflektometrickou metodou jsou po této stránce v celém proměřovaném rozsahu v tolerovaných mezích.

Mimo to, všechna vlákna kromě vlákna č. 1 byla proměřena pomocí metody fázového posuvu, která spíše než chování vlákna napříč spektrem vlnových délek ověřovala chování vlákna v okolí vlnové délky 1550 nm. Žádné z ověřovaných vláken na této vlnové délce nepřekračuje povolené limity pro CD, ale obraz o chování vlákna a jeho chromatické disperze ve zbytku spektra vlnových délek toto měření nenabízí. Další vývoj je tak pouze odhadovatelný z lineárního vývoje charakteristiky.

## ***Polarizační vidová disperze***

Z pohledu polarizační vidové disperze jsou všechna optická vlákna, u nichž byla PMD měřena a následně počítán koeficient PMD, vyhovující s velkými rezervami, což je také důsledkem malé délky trasy a PMD se tudíž tolik neprojevuje. Díky této skutečnosti je možné předpokládat nedostatečné projevení PMD i na optických vláknech, na kterých PMD nebyla měřena.

## ***Chyby měření***

Největší chyba měření vznikla při použití příliš dlouhých optických vláken sloužících pro připojení měřících přístrojů k proměřovaným vláknům a jejich následným rozkmitáním vzniklým běžným používáním měřících přístrojů.

## 6 Závěr

Mezi metodami zvyšování přenosových rychlostí patří systémy xWDM v tomto odvětví mezi jeden z nejdostupnějších a v dnešní době hojně využívaný způsob řešení tohoto problému. V této práci jsou mimo jiné zhodnoceny jejich druhy, současný stav a naznačen směr jakým se hodlají v nejbližších letech ubírat.

Základním kamenem, na kterém je metodika měření optických páteřních sítí postavena, jsou měřicí metody, s jejichž pomocí lze určit parametry určující kvalitu konkrétní optické trasy, kterými jsou útlum, chromatická a polarizační vidová disperze. Jsou zde uvedeny a rozebrány nejvhodnější a v praxi nejrozšířenější metody pro budoucí zjišťování charakteristiky rozšiřované části BAPS a její přechod na 40 Gb/s, společně s možnými řešeními.

V další části byl proveden rozbor dostupných měřicích přístrojů, bez nichž by samotný proces zrychlování optické sítě nemohl být započat. Z hodnocení a výstupu měřidel vyplývá, že řada použitých měřidel *EXFO* v distribuci firmy *PROFIBER* je velmi dostupnou a vhodnou variantou pro takový typ měření.

Zásadním výstupem této práce je určení vhodnosti části optické sítě (konkrétně BAPS) na případný přechod na vyšší rychlosti z provedených měření pomocí výše navrhovaných metod měření. Tím byly získány údaje o současném stavu optické trasy *Campus Bohunice – Koleje Komárov*. Porovnáním naměřených hodnot s limitními hodnotami každého parametru uvedených v doporučení *ITU-T*, pro určitou konfiguraci plánovaného rozšíření provozu (především vyšší přenosové rychlosti), byl získán přehled nejzásadnějších problémů, které by mohly ohrozit kvalitu přenosu na této trase a znemožnit tak použití vyšších přenosových rychlostí.

Z provedených porovnání vyplynulo, že zásadním problémem je kvalita optických vláken z pohledu míry zpětného odrazu jejich spojek a konektorů, které jsou zřejmě již zastaralé a nekvalitní. Navrhované řešení spočívá ve výměně stávajících konektorů za konektory APC. Vzhledem k délce optické trasy (přibližně 8,4 km) se chromatická a polarizační vidová disperze příliš neuplatňují, tudíž není potřeba provádět jejich redukci za pomoci protipatření jakými mohou být např. použití vlákna DSF, Braggovské mřížky nebo v mezním případě výměna kabelových délek. I přes chyby vzniklé při měření se dá říci, že měření hodnot s použitými přístroji bylo postačující pro určení obrazu o stávajícím stavu sítě.

Ze získané charakteristiky části BAPS lze konstatovat, že na této části sítě lze zajistit provoz s přenosovou rychlostí 40 Gb/s pouze za podmínek výměny konektorů na měřených optických linkách a to jak na linkách se zpětným odrazem překračujícím normu pro tuto přenosovou rychlost, tak i preventivně na linkách, jejichž hodnoty zpětného odrazu dosud vyhovují. Co se týká chromatické a polarizační vidové disperze, protipatření pro jejich

omezení zde nejsou zapotřebí a tak by v cestě plánovanému přechodu části BAPS na vyšší rychlosti stát neměly.

## Seznam literatury a použitých zdrojů:

- [1] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. 1. vyd., CENTA, Brno, 2009. 369 s.
- [2] FILKA, M. *Přenosová média*. Skripta laboratoře. VUT FEKT, Brno 2003.
- [3] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Mikrom, Praha 2001.
- [4] ITU-T Rec. G.694.1. *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, (06/2002).
- [5] ITU-T Rec. G.694.2. *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*, (12/2003).
- [6] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P. *Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření*. [online]. [2009] [cit. 2009-6-12].  
Dostupný z WWW: <<http://www.mikrokom.eu>>.
- [7] *PROFIBER networking*. [online]. [2007] [cit. 2009-11-12].  
Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz>>.
- [8] *MIKROKOM*. [online]. [2009] [cit. 2009-11-12].  
Dostupný z WWW: <<http://www.mikrokom.eu>>.
- [9] AUDET, F. *Application Note 044*. [online]. [2010] [cit. 2010-13-04].  
Dostupný z WWW: <<http://documents.exfo.com/appnotes/anote044-ang.pdf>>.
- [10] LIETAERT, G. *Optical Return Loss Measurement*. [online]. [2010] [cit. 2010-16-04].  
Dostupný z WWW:  
<[http://www.jdsu.com/product-literature/JDSU\\_opticalreturnloss\\_wp\\_fop\\_tm\\_ae\\_0206.pdf](http://www.jdsu.com/product-literature/JDSU_opticalreturnloss_wp_fop_tm_ae_0206.pdf)>.
- [11] ITU-T Rec. G.691 . *Optical interfaces for single channel STM-64 systems, STM-256 systems, and other SDH systems with optical amplifiers*, (03/2006).
- [12] ITU-T Rec. G.652 . *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* (06/2005).
- [13] ITU-T Rec. G.695 . *Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications* (12/2006).
- [14] DENNIS, T., WILLIAMS, P. A. *Relative Group Delay Measurements with 0.3 ps Resolution: Toward 40 Gbit/s Component Metrology*. [online]. [2002] [cit. 2010-15-5].  
Dostupný z WWW:  
<[http://www.boulder.nist.gov/div815/81503\\_pubs/DRGDDocs/Dennis-OFC-02.pdf](http://www.boulder.nist.gov/div815/81503_pubs/DRGDDocs/Dennis-OFC-02.pdf)>.
- [15] KYSELÁK, M. *Moderní způsoby řešení PMD u stávajících optických tras*. [online]. [2006] [cit. 2010-15-5].  
Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006042001>>.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

- BAPS* – Brněnská akademická počítačová síť
- BER* – (Bit Error Rate) Bitová chybovost
- CD* – (*Chromatic Dispersion*) Chromatická disperze
- CWDM* – (Coarse Wavelength Division Multiplex) Hrubý vlnový multiplex
- DCF* – (Dispersion Compensation Fibre) Vlákno kompenzující disperzi
- DGD* – (Differential Group Delay) Diferenční skupinové zpoždění
- DSF* – (Dispersion Shifted Fibre) Vlákno s posunutou disperzní charakteristikou
- DWDM* – (Dense Wavelength Division Multiplex) Hustý vlnový multiplex
- GINTY* – (General Interferometric Analysis) Hlavní interferometrická analýza
- HOM* – (High Order Mode Fibre) Vlákno s videm vyššího řádu
- ITU* – (International Telecommunication Union) Mezinárodní telekomunikační unie
- LD* – (Laser Diode) Laserová dioda
- LED* – (Light Emitting Diode) Dioda emitující světlo
- MM* – (Multi Mode) Vícevidová vlákna
- NIST* – Národní institut pro standardy a technologie
- NZDF* – (Non Zero Dispersion Fibre) Vlákno s nenulovou disperzí
- OLTS* – (Optical Loss Test Set) Testování optických ztrát
- OTDR* – (Optical Time-Domain Reflectometry) Metoda zpětného rozptylu
- PMD* – (Polarization Mode Dispersion) Polarizační vidová disperze
- PS* – (Phase Shift) Metoda fázového posuvu
- RGD* – (Relative Group Delay) Relativní skupinové zpoždění
- SDH* – (Synchronous Digital Hierarchy) Synchronní digitální hierarchie
- SM* – (Single Mode) Jednovidová vlákna
- SNR* – (Signal to Noise Ratio) Poměr signál – šum
- TINTY* – (Traditional Interferometric Analysis) Obvyklá interferometrická analýza
- WDM* – (Wavelength Division Multiplex) Vlnový multiplex
- WWDM* – (Wide Wavelength Division Multiplex) Široký vlnový multiplex

$A$  – útlum optického vlákna [dB]

$\alpha$  – měrný útlum optického vlákna [ $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ]

$D$  – koeficient chromatické disperze [ $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ]

$\Delta\tau$  – zpoždění signálu [s]

$\lambda$  – vlnová délka [m]

$l$  – délka trasy [m]

$ORL$  – ztráty odrazem [dB]

$P_1$  – vstupní výkon [W]

$P_2$  – odražený výkon [W]

$PMD$  – koeficient polarizační vidové disperze [ $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$ ]

$t_g$  – skupinové zpoždění [s]

